



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Caraterização de Argamassas com Incorporação de Resíduos de Casca e Palha de Arroz

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Construções

Autor

Margarida Morais Monteiro

Orientadores

Professor Doutor António José Barreto Tadeu

Professora Doutora Maria Isabel Morais Torres

Colaboração Institucional



Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Julho, 2015

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço aos meus orientadores Professor Doutor António Tadeu e Professora Doutora Isabel Torres pela disponibilidade, apoio e orientação prestados, bem como pelos conhecimentos transmitidos ao longo deste percurso.

Agradeço também a cedência de instalações, materiais e equipamentos ao Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção (ITeCons), bem como a todas as pessoas que se mostraram sempre disponíveis para me apoiar em todos os procedimentos, em particular, à Doutora Gina Matias, pelo seu incansável apoio, compreensão, paciência e simpatia ao longo deste trabalho.

A toda a minha família, que sempre demonstra carinho e motivação incondicionais, em particular ao meu pai, Joaquim, que tantas vezes foi o meu incentivo e fonte de inspiração, à minha mãe, Filomena, pela sua constante boa disposição tão característica e por todas as palavras de encorajamento, e às minhas irmãs, Mariana e Joana, pela amizade tão particular e inigualável.

A todos os meus amigos, aos que acompanharam o meu percurso académico em Coimbra, pois sempre me ajudaram a ultrapassar as fases mais complicadas e a aproveitar os bons momentos que passámos nesta cidade, e aos que estão longe que, de uma forma ou de outra, estão sempre comigo e presenciaram tantos acontecimentos ao longo da minha vida.

Por último, devo um agradecimento muito especial à Quantunna, pela amizade, companheirismo, espírito de união e pelos momentos de convívio e descontração que me proporcionaram. Que esta família se mantenha por muito tempo.

RESUMO

O primeiro meio de proteção de uma parede exterior é o seu revestimento, pois protege o suporte de ações externas e confere, em grande parte, impermeabilização contra os agentes atmosféricos. Além disso assume um papel de grande importância nas características estéticas dos paramentos.

No panorama atual, é importante ter em conta a sustentabilidade dos materiais utilizados na construção e tem-se assistido à evolução das técnicas construtivas bem como a estudos no sentido de usar materiais mais favoráveis do ponto de vista ambiental.

Os resíduos de casca e palha de arroz são produzidos em ampla escala na região do Baixo Mondego e o principal objetivo desta dissertação é averiguar a viabilidade da incorporação desses resíduos em argamassas de reboco com requisitos de isolamento térmico. Desta forma evita-se a deposição de resíduos em aterro, promovendo a sustentabilidade no setor da construção civil, e melhoram-se as características das argamassas, nomeadamente o seu comportamento térmico. Para tal foram executados provetes das referidas argamassas para se proceder à realização de uma campanha experimental, analisando o comportamento das mesmas. Verificou-se uma evidente melhoria das características térmicas, face a argamassas de cimento (sem resíduos).

Foi feito apenas um estudo de argamassas com incorporação dos referidos resíduos, tendo-se obtido alguns resultados positivos, por isso existe interesse otimizar esses resultados. A introdução de resíduos em argamassas reveste-se de grande importância, pois outros estudos neste âmbito já foram levados a cabo, tais como, a influência da incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas de reabilitação.

ABSTRACT

The first mean of protection from an outside wall is the external wall coating, it protects the support from external actions and it provides waterproofing against atmospheric agents. It also has the function to assign aesthetic characteristics of the wall.

Nowadays, it is important to take into account the sustainability of materials used in construction and building techniques are in progress as well as investigations about using beneficial materials from an environmental point of view.

Waste husk and rice straw are produced on a large scale in Baixo Mondego region and the main goal of this work is to investigate the feasibility of incorporating the waste in mortars with thermal insulation requirements. Thus, waste disposal is avoided, so sustainability is promoted in construction sector, and mortar's thermal properties are improved. For this purpose mortar specimens were made and their behavior was analyzed through experimental tests. There was an improvement of thermal properties, compared to cement mortars (without waste).

The study of incorporation of rice waste was made and some of the results were positive, so the optimization of these results is important. Introducing waste in mortars is an interesting topic because other studies were made in this area such as the incorporation of ceramic waste in replacement mortars.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE QUADROS	vii
ABREVIATURAS	viii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos e metodologia	2
1.3 Estrutura da dissertação	3
2. ESTADO DO CONHECIMENTO	4
2.1 Argamassas	4
2.2 A produção de arroz em Portugal e no Mundo	17
2.3 Argamassas com casca e palha de arroz	18
3. MATERIAIS E TÉCNICAS	20
3.1 Caraterização das matérias-primas	20
3.2 Preparação das argamassas	24
3.3 Ensaios sobre as argamassas no estado fresco	25
3.4 Ensaios sobre as argamassas no estado endurecido	27
4. RESULTADOS	41
4.1 Análise granulométrica por peneiração	41
4.2 Baridade dos materiais	42
4.3 Consistência por espalhamento	43
4.4 Resistência à tração por flexão e à compressão	44
4.5 Porosidade aberta e massa volúmica aparente	45
4.6 Absorção de água por capilaridade	47
4.7 Secagem	50

4.8	Permeabilidade ao vapor de água	51
4.9	Condutibilidade Térmica	53
4.10	Discussão de resultados	55
5.	CONCLUSÕES.....	60
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ciclo da cal.....	8
Figura 2.2 – Efeito de um plastificante na pasta de cimento. a) Partículas de cimento sem plastificante; b) Partículas de cimento por efeito da adição de um plastificante (Veiga, 1998).	13
Figura 2.3 – Planta do arroz (www.irri.org, 2015)	17
Figura 3.1 – Areia de rio (Martins, T., 2015)	20
Figura 3.2 – Moinho utilizado para triturar a palha de arroz.....	21
Figura 3.3 – Palha moída. a) Palha fina; b) Palha grossa	21
Figura 3.4 – Casca de arroz (Martins, T., 2015).....	22
Figura 3.5 – Peneiros utilizados (Raimundo, 2013)	23
Figura 3.6 – Eliminação do excesso de material (Martins, T., 2015).....	24
Figura 3.7 – Mesa de espalhamento (CEN, 1999).....	26
Figura 3.8 – Ensaio de resistência à tração por flexão	27
Figura 3.9 – Metades resultantes do ensaio de resistência à tração por flexão	28
Figura 3.10 – Ensaio de resistência à compressão.....	28
Figura 3.11 – Distinção entre um material com porosidade aberta e outro com porosidade fechada (Freitas et al, 2008)	29
Figura 3.12 – Provetes para determinação da porosidade aberta	30
Figura 3.13 – Balança para pesagem hidrostática	31
Figura 3.14 – Ensaio de absorção por capilaridade	33
Figura 3.15 – Conjunto provete/tina para ensaio de permeabilidade ao vapor de água	36
Figura 3.16 – Equipamento λ -Meter EP500	38
Figura 3.17 – Proвете para ensaio de determinação da condutibilidade térmica	39
Figura 3.18 – Preparação do ensaio para determinação da condutibilidade térmica. a) e b) Proвете centrado no equipamento, envolvido por fibra de <i>polyester</i>	40
Figura 4.1 – Curva granulométrica da areia de rio	42
Figura 4.2 – Ensaio de consistência por espalhamento de ACA.....	44
Figura 4.3 – Resumo dos resultados de resistência à flexão e à compressão	45
Figura 4.4 – Resumo dos resultados de porosidade aberta e massa volúmica aparente.....	47

Figura 4.5 – Absorção de água por capilaridade no tempo total de ensaio	49
Figura 4.6 – Absorção de água por capilaridade nas primeiras três horas de ensaio	49
Figura 4.7 – Curva de secagem no tempo total de ensaio	51
Figura 4.8 – Curva de secagem nos primeiros 8 dias	51
Figura 4.9 – Permeabilidade ao vapor de água e espessura da camada de ar equivalente	53
Figura 4.10 – Resumo dos resultados do ensaio para determinação da condutibilidade térmica	54
Figura 4.11 – Porosidade aberta e permeabilidade ao vapor de água.....	55
Figura 4.12 – Porosidade aberta e índice de secagem	56
Figura 4.13 – Porosidade aberta e coeficiente de capilaridade.....	57
Figura 4.14 – Índice de secagem e coeficiente de capilaridade.....	57

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Classificação do agregado	6
Quadro 2.2 – Adjuvantes comumente utilizados em argamassas de revestimento	11
Quadro 2.3 – Requisitos para obter uma argamassa de isolamento térmico	16
Quadro 3.1 – Caraterização das argamassas.....	24
Quadro 4.1 – Determinação da curva granulométrica da areia	42
Quadro 4.2 – Baridade das matérias-primas.....	43
Quadro 4.3 – Consistência por espalhamento	43
Quadro 4.4 – Resistência à flexão e à compressão	44
Quadro 4.5 – Porosidade aberta e massa volúmica aparente.....	46
Quadro 4.6 – Coeficiente de absorção de água por capilaridade.....	47
Quadro 4.7 – Índice de secagem.....	50
Quadro 4.8 – Resultados do ensaio de permeabilidade ao vapor de água.....	52
Quadro 4.9 – Condutibilidade térmica e resistência térmica.....	54
Quadro 4.10 – Síntese dos resultados	59
Quadro 4.11 – Verificação dos requisitos para se obter uma argamassa de isolamento térmico	59

ABREVIATURAS

AR – Argamassa de Referência

ACA – Argamassa com Casca de Arroz

APAF – Argamassa com Palha de Arroz Fina

APAG – Argamassa com Palha de Arroz Grossa

CE – Comissão Europeia

CEN – Comité Europeu de Normalização

EN – Norma Europeia

HR – Humidade Relativa

IPQ – Instituto Português de Qualidade

ISO – Organização Internacional para Padronização

ITeCons – Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção

NP – Norma Portuguesa

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Atualmente o desenvolvimento sustentável revela-se uma preocupação fulcral e crescente na maioria dos países desenvolvidos e nos países em vias de desenvolvimento, englobando questões económicas, sociais e ambientais, que não devem interferir entre si de forma negativa. A atividade humana é geradora de resíduos e o aproveitamento dos mesmos é, por isso, um assunto de grande interesse a nível global. No setor da construção civil já há estudos desenvolvidos sobre o aproveitamento de resíduos em materiais de construção, como por exemplo, a incorporação de resíduos de cerâmica em argamassas de reabilitação.

As argamassas são componentes muito importantes da construção desde há muito tempo, funcionam como elemento aglutinador de outros materiais ou como revestimento interior ou exterior de paredes. Esta última função tem um papel fundamental no desempenho geral de um edifício, a nível da segurança, estética e durabilidade. Oferece revestimento e proteção ao suporte contra ações exteriores, climáticas e mecânicas, evitando a sua degradação e promovendo a sua impermeabilização. Além disso, o revestimento é também responsável pelo aspeto estético dos paramentos, conferindo-lhes um acabamento visualmente confortável, parâmetro este que se revela igualmente importante.

As argamassas comuns são constituídas por uma mistura de agregado, ligante e água. A investigação de novas formulações de argamassas com incorporação de resíduos permite a redução do consumo de agregado e ligante correntes. A produção deste último envolve um considerável consumo de energia e elevada produção de CO₂. Já a extração do agregado é, a maioria das vezes, de origem natural, e tem consequências ambientais nefastas importantes (Matias, 2014).

Deste modo, torna-se importante investigar possibilidades de aproveitamento de resíduos no setor da construção, mais concretamente a nível da produção de argamassas, visando a obter benefícios a nível técnico e ambiental. Consequentemente assegura-se ainda o cumprimento do novo regulamento dos produtos da construção, Regulamento (EU) n.º 305/2011 do Parlamento Europeu e do Conselho de Março de 2011, que prevê a utilização sustentável dos recursos naturais através, por exemplo, da “utilização, nas obras de construção, de matérias-primas e materiais secundários compatíveis com o ambiente” (Parlamento e Conselho Europeu, 2011).

Se a introdução de resíduos nas argamassas ainda nos permitir melhorar as suas propriedades então este aproveitamento de resíduos torna-se duplamente interessante.

A casca e a palha de arroz são resíduos provenientes da indústria do arroz e ainda não é conhecido um destino sustentável para o seu aproveitamento, quer a nível económico, quer a nível ambiental. A presente dissertação surge no seguimento de um trabalho anterior, no qual se obtiveram resultados interessantes ao introduzir estes resíduos em argamassas, sendo pioneiro neste estudo. Além de se ter comprovado a viabilidade da introdução dos resíduos referidos conseguiu-se ainda melhorar substancialmente o comportamento térmico das argamassas. Pretende-se agora tentar otimizar esses resultados e avaliar a viabilidade de se conseguir obter uma argamassa que possa ser considerada como argamassas de isolamento térmico, de acordo com a NP EN 998-1:2013 (IPQ, 2013).

1.2 Objetivos e metodologia

Nesta dissertação pretende-se caraterizar do ponto de vista mecânico e higrotérmico a influência da introdução de resíduos de casca e palha de arroz, substituindo parte do agregado, em argamassas de cimento de modo a obter uma argamassa térmica segundo os requisitos da norma NP EN 998-1:2013 (IPQ, 2013). A durabilidade dos rebocos é também analisada através dos ensaios realizados.

Produziram-se três argamassas diferentes com incorporação de resíduos: uma com incorporação de casca de arroz e duas com palha. Esta última foi moída em duas dimensões diferentes, dando origem a duas argamassas distintas, e a casca de arroz adicionou-se à mistura com a sua dimensão original. As amostras têm traço volumétrico semelhante, 1:2.5 (cimento:agregado), e através da comparação com uma quarta mistura sem introdução de resíduos, designada por argamassa de referência, retiraram-se conclusões no que diz respeito às características e requisitos que se pretendem estudar. Foram feitos ensaios nas argamassas no seu estado fresco bem como no estado endurecido, sendo que estes últimos foram levados a cabo após o período de 28 dias de cura.

Uma vez que este trabalho pretende dar continuidade a um estudo desenvolvido anteriormente por outro mestrando, Martins, T. (2015), pretendeu-se otimizar os resultados obtidos por este, utilizando adjuvantes na mistura que visam o melhoramento de características específicas, nomeadamente ao nível da condutibilidade térmica e absorção de água.

Deste modo, trata-se de um trabalho de cariz experimental e requer-se que a contribuição deste seja relevante para o aproveitamento dos resíduos de casca e palha de arroz que são

produzidos na zona do Baixo Mondego, bem como noutras zonas do país. Pretende-se também que origine resultados melhorados a nível do comportamento desta nova formulação de argamassas mais sustentáveis.

1.3 Estrutura da dissertação

Este texto encontra-se organizado em seis capítulos.

O primeiro capítulo é introdutório e expõe brevemente o tema, através do seu enquadramento geral e da descrição sumária da metodologia adotada e objetivos de trabalho a cumprir.

O segundo capítulo reflete o atual estado do conhecimento e encontra-se dividido em três subcapítulos. O primeiro diz respeito aos constituintes das argamassas e suas características, bem como exigências funcionais das mesmas e os requisitos que devem cumprir para serem consideradas argamassas térmicas. No segundo subcapítulo é abordada a produção de arroz no mundo, bem como os resíduos resultantes, e ainda a cultura de arroz no Baixo Mondego. O último subcapítulo apresenta o estudo anteriormente efetuado sobre esta temática e que tem relevância no enquadramento do presente trabalho.

O terceiro capítulo expõe todo o trabalho experimental desenvolvido, onde se descrevem os procedimentos experimentais adotados.

O quarto capítulo apresenta todos os resultados obtidos e uma breve análise crítica dos mesmos, consequentes do procedimento experimental.

O quinto capítulo refere-se à conclusão. Neste ponto incluem-se considerações finais, onde é feita uma reflexão global do trabalho desenvolvido e, por fim, uma proposta de trabalhos futuros dentro desta temática.

No sexto capítulo encontram-se as referências bibliográficas, que compilam todos os elementos de pesquisa que foram consultados para levar a cabo este trabalho.

2. ESTADO DO CONHECIMENTO

2.1 Argamassas

A aplicação de argamassas de revestimento é uma técnica muito antiga para proteção e decoração de alvenarias que remonta ao antigo Egito e Médio Oriente, onde o principal constituinte era o gesso. Além do gesso os outros constituintes eram a argila e a água, com adição de palha e fibras vegetais, com o propósito de melhorar as suas propriedades (Velosa, 2006).

Mais tarde, os Romanos introduziram ligantes à base de cimentos naturais e lavas vulcânicas, aproveitando a capacidade que algumas substâncias têm de conferir propriedades hidráulicas às argamassas de cal aérea. Assim, este povo que se notabilizou como pioneiro na engenharia e construção de infraestruturas muito sofisticadas, tais como canalizações, aquedutos, estrada e pontes, construiu edifícios de grande porte, com grandes vãos interiores, devido às propriedades de elevada resistência mecânica apresentadas pelos ligantes utilizados (Raimundo, 2013).

Por fim, regista-se a descoberta da cal hidráulica no século XVIII e, por volta do século XIX, é registada a patente do cimento Portland, que conduziu ao declínio do uso da cal como ligante (Matias, 2008). Atualmente o cimento é o ligante mais utilizado na produção de argamassas.

Genericamente, uma argamassa é uma mistura homogénea e de cor uniforme, resultante da junção de um ou mais ligantes, agregados, que podem ser sintéticos, minerais ou orgânicos, e água. Além destes constituintes podem adicionar-se substâncias aditivas ou adjuvantes para melhorar determinadas características. No processo de fabrico devem misturar-se em primeiro lugar os elementos sólidos e posteriormente adicionar a água de amassadura. De entre as utilizações conhecidas para as argamassas, a sua aplicação como reboco é, provavelmente, a que apresenta maior relevância.

As propriedades dos constituintes das argamassas e as suas proporções são determinantes para o seu comportamento e, como referido anteriormente, os principais constituintes sólidos são o agregado e o ligante. O primeiro elemento confere resistência à mistura e estabilidade dimensional e o segundo assegura coesão entre os agregados e preenche os espaços vazios entre eles. É fundamental o equilíbrio na distribuição de cada elemento, pois agregado em excesso pode originar uma argamassa com pouca coesão e ligante em excesso pode contribuir

para uma argamassa demasiado porosa e pouco resistente. Além destes, refira-se também a importância da quantidade de água, que deve ser suficiente para que ocorra a hidratação do ligante na sua totalidade e atribuir uma boa trabalhabilidade à argamassa. No entanto, uma quantidade excessiva de água contribui para a excessiva retração do ligante, o que conduz à fissuração dos revestimentos (Matias, 2008).

Nos próximos subcapítulos, encontram-se de uma forma mais detalhada as características de cada constituinte referido anteriormente.

2.1.1 Agregado

O agregado, ao ser incorporado na argamassa, tem como principais funções a diminuição da retração, a diminuição da quantidade de ligante necessário, o aumento da resistência à compressão, a atribuição de uma determinada coloração ao revestimento e o aumento da porosidade da argamassa (que provoca um aumento da permeabilidade ao vapor de água e maior resistência ao gelo) (Cavaco, 2005).

De acordo com (Matias, 2008) há diversos requisitos a cumprir para que o agregado contribua para o bom comportamento de argamassas:

- Deve ter uma boa inércia química, ou seja, não deve reagir quimicamente com os restantes componentes e apresentar um bom comportamento na presença de ar e água, não reagindo com estes;
- Deve apresentar alguma limpeza e, se necessário, ser sujeito a lavagem prévia. A existência de partículas contaminantes, como matéria orgânica ou partículas finas, pode conduzir a reações com o ligante;
- No que diz respeito à porosidade, quanto menos poroso for o agregado, maior será a sua resistência mecânica;
- A dimensão do agregado é um parâmetro importante, em função do fim a que se destina. Para camadas de reboco superficiais devem ser usados agregados mais finos, que confirmam maior regularidade.

Os agregados podem ser classificados segundo os mais diversos parâmetros, variando de autor para autor. No próximo parágrafo apresenta-se a classificação em função da sua origem, das suas dimensões e da massa volúmica.

No que diz respeito à sua origem, os agregados podem ser de origem natural, se forem aplicados tal como existem na natureza; de origem industrializada, sofrendo transformações através de processos industriais; e de origem reciclada, se forem resultado de resíduos

industriais, tal como os desperdícios da construção ou resíduos resultantes da exploração de pedra (Paulo, 2006). Como exemplo de agregados de origem reciclada enumerem-se os materiais provenientes de desperdícios industriais, como por exemplo, o tijolo moído ou resíduos resultantes da exploração da pedra, que apresentem uma granulometria adequada (Silva, 2012).

O agregado pode também classificar-se em função das dimensões das suas partículas em agregado fino ou grosso. O primeiro apresenta dimensões inferiores a 4mm, como é o caso das areias naturais ou britadas, ao passo que o segundo representa partículas com dimensões superiores à mencionada, tais como godos, britas e seixos (Matias, 2008).

Por último, também se pode classificar o agregado em função da sua massa volúmica, como leve (inferior a 2000 kg/m^3), médio ou normal (entre 2000 a 3000 kg/m^3) e pesado (superior a 3000 kg/m^3) (Coutinho, 1999). No Quadro 2.1 apresenta-se um resumo da classificação explanada.

Quadro 2.1 – Classificação do agregado

Classificação		Caraterísticas
Origem	Natural	Utilizado como existe na natureza
	Industrializada	Sofre transformações por processos industriais
	Reciclada	Reciclagem/reutilização de resíduos
Dimensões	Fino	Dimensões $< 4\text{mm}$
	Grosso	Dimensões $\geq 4\text{mm}$
Massa volúmica	Leve	$\gamma < 2000 \text{ kg/m}^3$
	Médio ou Normal	$2000 \text{ kg/m}^3 < \gamma < 3000 \text{ kg/m}^3$
	Pesado	$\gamma > 3000 \text{ kg/m}^3$

γ – massa volúmica.

Relativamente à granulometria, esta deve ser extensa e bem equilibrada, uma vez que as partículas de maior dimensão conferem maior resistência à argamassa e as de menores dimensões reduzem o índice de vazios. Desta forma, é possível diminuir a quantidade de ligante e, conseqüentemente, o fenómeno de retração, mantendo-se a compacidade e trabalhabilidade da argamassa (Tomás, 2012).

A areia siliciosa, proveniente de rios ou areiros, é o agregado comumente utilizado na composição de argamassas, com uma dimensão não superior a 4,75 mm, passando no peneiro

com essa abertura. Esta é constituída maioritariamente por quartzo e em quantidades menores por micas e feldspatos (Penas, 2008).

2.1.2 Ligante

Segundo Agostinho (2008), citando vários autores, o ligante apresenta a forma de partículas muito finas que têm como função aglutinar os constituintes das argamassas, preenchendo os espaços vazios, e proporcionar coesão e resistência à mistura, como já foi mencionado anteriormente. Adicionando água ao ligante, gera-se uma reação química entre esse pó muito fino e a própria água, criando uma pasta que ganha presa e endurece.

De acordo com Rodrigues (2004), tendo como referência o trabalho outros autores, os ligantes podem ser classificados em três categorias: hidráulicos, aéreos e orgânicos. Os ligantes hidráulicos consistem em pós muito finos que, amassados com água, formam uma pasta. Esta pasta endurece através da reação química entre o pó e a água e este processo dá-se tanto ao ar como dentro de água. Os ligantes aéreos, ao contrário dos anteriores, não endurecem imersos, pois dependem do dióxido de carbono existente na atmosfera para que se desenvolva esse processo. Em relação aos ligantes orgânicos, podem referir-se os casos dos hidrocarbonetos e das resinas sintéticas.

Os ligantes mais comuns são a cal e o cimento e em função destes podem produzir-se três diferentes argamassas: argamassas de cal, cujos seus constituintes são a cal, a areia e a água, argamassas de cimento, constituídas por cimento, areia e água, e podem ainda criar-se argamassas bastardas, a partir da mistura de ambos os ligantes, cal e cimento, areia e água.

2.1.2.1 Cal

Em relação à cal, esta resulta de um processo de cozedura de elementos com elevada percentagem de carbonato de cálcio (CaCO_3). Este elemento, por ação de temperaturas da ordem dos 900°C , decompõe-se em óxido de cálcio (CaO), libertando dióxido de carbono (CO_2), reação conhecida como *Calcinação*. O óxido de cálcio produzido é usualmente denominado por cal viva, que imersa em água dá origem ao processo de *Hidratação* ou *Extinção da Cal Viva*, da qual resultam hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e calor. Quando a cal se encontra devidamente apagada está apta para ser utilizada em obra e, após a sua aplicação, ocorre o processo de presa, no qual o hidróxido de cálcio reage com o dióxido de carbono presente na atmosfera, formando-se novamente carbonato de cálcio, ocorrendo libertação de água, ou seja, ocorre *Carbonatação*. Este processo denomina-se de ciclo da cal (Tomás, 2012) (Figura 2.1).

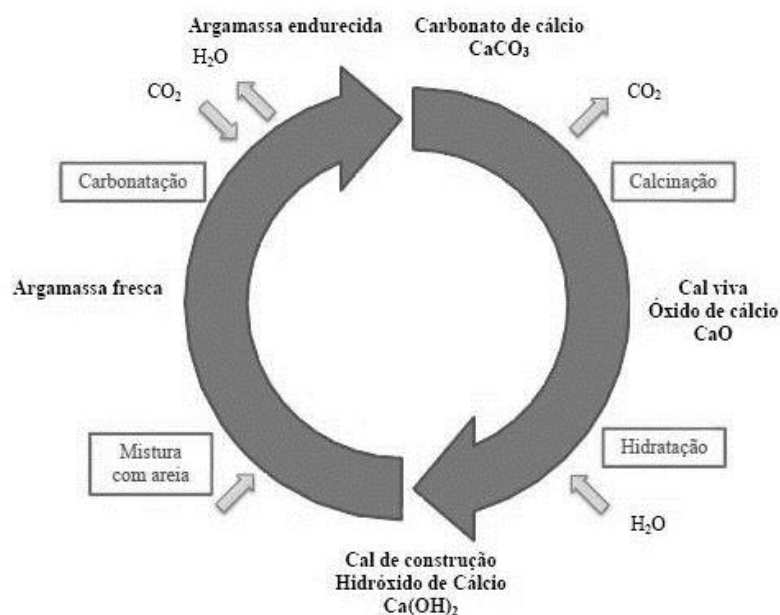


Figura 2.1 – Ciclo da cal

Saliente-se ainda a distinção entre cal aérea e cal hidráulica, em que a principal diferença é no processo de presa. A primeira só inicia esse processo quando está em contacto com o dióxido de carbono presente na atmosfera, sendo incapaz de endurecer na presença de água, ao contrário da segunda, que endurece mesmo imersa. Este facto deve-se ao calcário utilizado conter algumas impurezas que irão reagir com o óxido de cálcio, formando-se aluminatos e silicatos (compostos parecidos aos presentes no cimento Portland) que reagem com a água e cristalizam (Cavaco, 2005).

2.1.2.2 Cimento

Podem distinguir-se quatro tipos de cimento: Portland, Portland composto, alto-forno e pozolânico. Além desta classificação, os cimentos distinguem-se ainda segundo classes de resistência de 32,5, 42,5 e 52,5 MPa (Leal, 2012) e a seleção da resistência faz-se em função da utilização da argamassa. Por exemplo, numa argamassa de assentamento de uma alvenaria, o comportamento mecânico é o fator mais importante, porém, quando se trata de um reboco, a impermeabilidade e a aderência são as características mais importantes enquanto a resistência à compressão reveste-se de menor importância (Mendonça, 2007).

O cimento Portland é o ligante mais utilizado em Portugal nas formulações de argamassas e ganha presa tanto ao ar como imerso, o que o torna um ligante hidráulico. É obtido partindo de uma mistura de cálcio, silício, magnésio, alumínio e ferro, em quantidades adequadas. Numa primeira fase, estes constituintes são reduzidos a um pó muito fino para serem posteriormente submetidos a temperaturas na ordem dos 1450°C, resultando o clínquer. Este é composto por quatro minerais artificiais:

- Silicatos bicálcicos, $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$, (10 a 55%);
- Silicatos tricálcicos, $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$, (20 a 65%);
- Aluminato tricálcico, $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$, (0 a 15%);
- Ferro-aluminato tetracálcico, $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ (5 a 15%).

Além destes, existem outros componentes em quantidades reduzidas que, quando em contacto com a água, hidratam e adquirem presa. Finalmente, o clínquer passa por um processo de moagem e é-lhe adicionada uma pequena quantidade de gesso com o objetivo de retardar a presa (Rodrigues, 2004).

Atualmente, os cimentos comercializados são certificados pela norma NP EN 197-1, que contempla as especificações e critérios de conformidade para os diferentes tipos de cimento. A referida norma indica ainda os requisitos fundamentais a satisfazer pelos constituintes, requisitos mecânicos, físicos e químicos, as classes de resistência e requisitos de durabilidade (Martins, A., 2008).

2.1.2.3 Cimento vs. Cal

A cal aérea, relativamente aos ligantes hidráulicos, ostenta algumas vantagens, tais como maior plasticidade, deformabilidade, trabalhabilidade, aderência, compatibilidade com o suporte e isenção de sais. Como desvantagens saliente-se o maior tempo de aplicação e maior tempo de secagem, bem como o facto de não ganhar presa em contacto com a água. No ponto de vista da resistência mecânica, apresenta valores inferiores quando comparada com os ligantes hidráulicos (Miranda, 2009).

Em relação à cal hidráulica, esta difere da anterior na medida em que ganha presa em contacto com a água, como já foi referido anteriormente. Esta cal tem aplicações idênticas às do cimento, no entanto, também apresenta valores de resistência mecânica inferiores. Como vantagens, enumere-se a capacidade de libertar água lentamente, o que evita retrações iniciais, é mais compacta e tem boa trabalhabilidade (Miranda, 2009).

O cimento caracteriza-se por ter alta resistência mecânica, baixa porosidade, boa trabalhabilidade e ser de fácil aplicação, o que acarreta benefícios a nível de mão-de-obra e,

consequentemente a nível económico. No entanto, também apresenta desvantagens quando utilizado em obras de reabilitação, devido à incompatibilidade com o suporte, e uma durabilidade inferior (Matias, 2008).

Em suma, as argamassas de cal são as mais adequadas para ações de reabilitação de edifícios antigos, essencialmente devido à sua compatibilidade com o suporte, que não se verifica em argamassas de cimento. Porém, estas últimas são mais vantajosas no ponto de vista da resistência mecânica e, em construções novas, a principal desvantagem já indicada não se reflete.

2.1.3 Água de amassadura

A hidratação do ligante é feita adicionando água, que origina a aglomeração dos constituintes sólidos, formando uma pasta. A quantidade de água de amassadura é função da trabalhabilidade e da consistência pretendidas e deve ser suficiente para hidratar o ligante, tendo sempre em linha de conta que a resistência à compressão geralmente diminui com o aumento da água e com a porosidade. Quando se adiciona água em excesso à mistura, pode resultar um maior volume de vazios aquando da evaporação da mesma, promovendo retração acentuada. Por outro lado, se a quantidade de água não for suficiente, pode obter-se uma amassadura pouco homogénea, o que não é desejável para a qualidade final do revestimento (Martins, A., 2008).

Idealmente, a água deve ser límpida, incolor, isenta de impurezas (tais como sais nocivos que podem provocar o aparecimento de patologias no revestimento a longo prazo) e de matéria orgânica, que pode ser responsável pela diminuição da resistência mecânica da argamassa (Ferreira, T., 2011).

2.1.4 Adjuvantes

De acordo com Frutuoso (2013), citando outros autores, os adjuvantes são substâncias utilizadas numa percentagem inferior a 5% da massa do ligante, sendo adicionados durante a amassadura aos componentes da argamassa. Com a adição de adjuvantes procura-se modificar e controlar determinadas propriedades das argamassas no estado fluido, no estado sólido e ainda no momento da passagem de um estado para outro.

Segundo Leal (2012), com base no trabalho de diversos autores, as utilizações fundamentais de adjuvantes são:

- Aumento da trabalhabilidade, sem aumento da quantidade de água da mistura;

- Aceleração ou redução do tempo de presa;
- Aceleração ou redução da progressão do endurecimento;
- Aumento da impermeabilidade;
- Alterações na resistência a ciclos gelo-degelo;
- Aumento da resistência mecânica, sem alteração da quantidade de ligante.

A integração destas substâncias na argamassa é desaconselhada sem a realização de ensaios prévios sobre a mesma e o custo inerente à sua utilização é, certamente, compensado na redução dos custos de mão-de-obra para a realização da compactação, no teor de cimento que seria necessário ou na melhoria da durabilidade (Leal, 2012).

Através do trabalho desenvolvido por Veiga (1998), listam-se no Quadro 2.2 alguns dos adjuvantes mais comuns utilizados em argamassas de revestimento.

Quadro 2.2 – Adjuvantes comumente utilizados em argamassas de revestimento

Adjuvante	Função
Promotor de aderência	Melhoramento da aderência. Aumento da resistência à tração simples e por flexão.
Hidrófugos de massa	Obturação dos capilares, impedindo a penetração de água e a sua circulação no revestimento.
Introdutores de ar	Pequenas bolhas de ar, que promovem corte de capilaridade, melhorando a capacidade de impermeabilização do revestimento e a sua resistência ao gelo-degelo e aos sais.
Plastificantes	Aumento da trabalhabilidade da argamassa e diminuição da segregação, permitindo a redução do teor de água da amassadura.
Retentores de água	Hidratação mais completa do revestimento, tornando-o menos sensível às condições climáticas.
Fungicidas	Impedimento da fixação de microrganismos na argamassa.
Pigmentos	Atribuição de coloração à argamassa.

Deste modo, é possível intervir na melhoria de caraterísticas específicas das argamassas a um nível intrínseco (químico). Além dos adjuvantes, existem também adições que promovem alterações físicas, melhorando igualmente propriedades específicas. No entanto, estas não são abordadas neste trabalho, pois não se utilizaram nas misturas produzidas. Nos subcapítulos seguintes abordam-se os hidrófugos de massa e plastificantes por serem os aditivos utilizados nas argamassas produzidas.

2.1.4.1 Hidrófugos de massa

Estes adjuvantes são geralmente constituídos por partículas finas insolúveis (sais metálicos de ácidos orgânicos em emulsão). Nas argamassas de reboco a sua dosagem não deve exceder os 2% da massa de cimento. O seu funcionamento consiste na obturação dos capilares, impedindo a penetração de água e a sua circulação no revestimento, através da redução da tensão capilar no interior da argamassa. Deste modo, a capilaridade da argamassa é reduzida, melhorando a capacidade de impermeabilização. Porém, para além das melhorias referidas, os hidrófugos podem limitar a aderência entre camadas com o próprio suporte e influenciar negativamente a aderência das tintas (Veiga, 1998).

2.1.4.2 Plastificantes

Os plastificantes têm como funções o aumento da trabalhabilidade da argamassa e diminuição da segregação, permitindo a redução do teor de água de amassadura e, eventualmente, do teor de ligante. Trata-se de um produto extremamente fino (por exemplo, argila coloidal, bentonite, cal gorda, calcário moído, entre outros) e o seu princípio de funcionamento baseia-se na dispersão das partículas do cimento na fase aquosa da argamassa, aumentando a sua superfície específica e facilitando a sua hidratação (Figura 2.2) (Veiga, 1998).

No entanto, o uso de plastificantes pode retardar a presa e reduzir as resistências iniciais. A sua eficácia aumenta com a diminuição da dosagem de cimento e com o aumento do grau de finura da argamassa (Veiga, 1998).

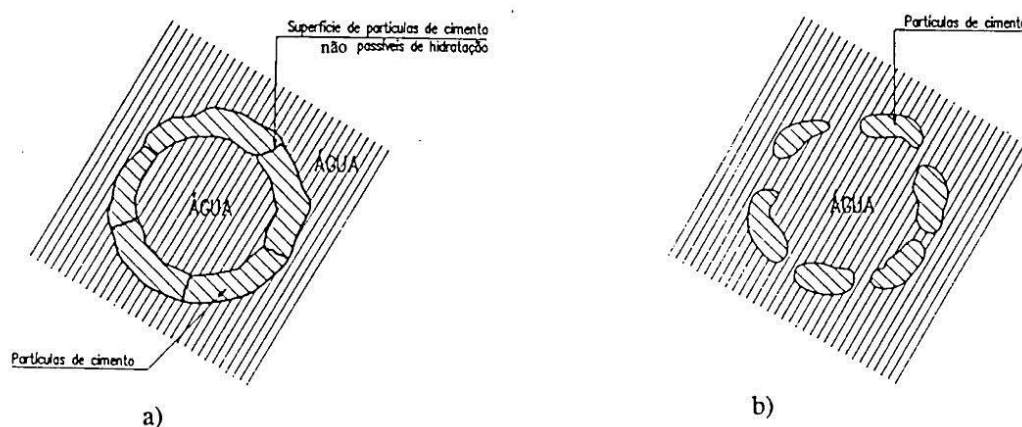


Figura 2.2 – Efeito de um plastificante na pasta de cimento. a) Partículas de cimento sem plastificante; b) Partículas de cimento por efeito da adição de um plastificante (Veiga, 1998).

2.1.5 Exigências funcionais das argamassas de reboco

O novo Regulamento dos Produtos da Construção da EU (2011), que revoga a DPC (Diretiva dos Produtos de Construção) institui determinadas condições para a comercialização dos produtos. Para tal, são utilizados dois tipos de especificações técnicas para a aplicação da marcação CE: as normas EN e as aprovações técnicas europeias (Ferreira, M., 2012).

Para serem lançadas no mercado, as argamassas pré-doseadas são alvo de um controlo interno de produção e qualidade por parte dos fabricantes, recorrendo a ensaios apropriados, a partir dos quais se emite a declaração de conformidade e se efetua a marcação CE, de modo a que seja cumprida a NP EN 998-1:2013 (IPQ, 2013). A marcação CE confirma que o produto está “Conforme os Requisitos Essenciais” e permite a livre circulação e comercialização na União Europeia, garantindo segurança, saúde e qualidade para os utilizadores.

Os rebocos têm como principais funções a regularização das imperfeições dos toscos, uniformizando a superfície, o acabamento dos paramentos e a proteção das alvenarias, formando uma barreira às ações externas. Refira-se ainda a impermeabilização das fachadas, que é a mais importante função dos rebocos exteriores, conferindo estanquidade ao conjunto tosco-revestimento. A penetração de água e o humedecimento-secagem favorecem a degradação dos elementos construtivos e afetam a condutibilidade térmica (Veiga, 1998).

Segundo Veiga (1998), citando diversos autores, podem enumerar-se requisitos essenciais que os rebocos exteriores devem cumprir de modo a garantir determinados padrões de qualidade:

- **Trabalhabilidade** – para ser facilmente aplicada e ter um bom rendimento, uma argamassa deve ter boa trabalhabilidade. O aumento do teor em finos, ligante e água condicionam este requisito, que se relaciona diretamente com a consistência da argamassa, enquanto fresca. Este aumento pode, por outro lado, ter consequências negativas no que diz respeito à aderência, permeabilidade à água e capacidade de absorver deformações, então, esta característica pode ser melhorada através da incorporação de adjuvantes apropriados (plastificantes ou introdutores de ar);
- **Resistência à fendilhação** – é função das características mecânicas da argamassa, dependendo por isso da resistência à tração introduzida pela restrição de retração e do módulo de elasticidade à tração. A tendência para a fendilhação por retração é tanto maior quanto mais elevada for a retração e a relação módulo de elasticidade-resistência à tração. Uma boa aderência ao suporte, que possibilita uma eficiente distribuição de tensões, e uma capacidade de retenção de água elevada, reduzindo os riscos de dessecação prematura da argamassa, contribui para um melhor comportamento à fendilhação. Além destes, refiram-se também o modo e as condições de aplicação, as características do suporte e os seus movimentos e deformações como fatores influenciadores da fendilhação do reboco;
- **Capacidade de impermeabilização em zona não-fendilhada** – é determinada pela capacidade de resistir à penetração de água até ao suporte proveniente do exterior e pela capacidade de permitir secagem da água em excesso rapidamente. As argamassas são materiais de porosidade aberta onde, por permeabilidade ou por capilaridade, a água pode penetrar, dependendo da dimensão dos poros e dos capilares;
- **Permeabilidade ao vapor de água** – a água em excesso, proveniente de infiltrações em fendas ou remates, absorvida pelo reboco e ainda a que faz parte da composição das alvenarias e rebocos que não seja necessária à hidratação, deve evaporar-se quando as condições atmosféricas o permitirem. Uma elevada permeabilidade ao vapor de água é importante para que se verifique esta condição. Além deste aspeto, a permeabilidade ao vapor de água influencia a higrometria interior, uma vez que a ocupação de espaços interiores origina a libertação de vapor de água por parte dos ocupantes, podendo levar à ocorrência de condensações. A prevenção deste fenómeno passa pelo isolamento térmico dos edifícios e pela correção das pontes térmicas, pelo aquecimento interior nos meses frios e pela ventilação adequada. No entanto, estas condições nem sempre são garantidas e por esta razão, é desejável a existência de uma envolvente exterior permeável ao vapor de água;
- **Aderência ao suporte** – permite que sejam cumpridas as funções de impermeabilização do revestimento, é condicionante para a sua durabilidade e tem influência na resistência à fendilhação, pois condiciona a distribuição de tensões na argamassa. A aderência das argamassas tradicionais deve-se à penetração capilar da água da amassadura nos poros de suporte, arrastando os elementos mais finos da argamassa. Esta é tanto melhor quanto mais

eficaz for a criação de uma pasta capaz de penetrar facilmente nos poros da alvenaria e endurecer mais rápido;

- Resistência aos choques – tem alguma importância nos revestimentos de paredes e, geralmente, os revestimentos de ligantes minerais asseguram resistência ao choque razoável quando aplicados sobre suportes tradicionais (alvenaria de tijolo e blocos de betão). Quando os revestimentos são aplicados com espessura reduzida, constituídos por ligante misto ou hidráulico com adjuvantes, sobre suportes de pouca resistência, este fator diminui. A aplicação de redes metálicas, de fibra de vidro ou materiais sintéticos ou de fibras dispersas na massa pode melhorar a resistência aos choques;
- Compatibilidade com o suporte – pode distinguir-se compatibilidade física, química, geométrica e mecânica. Na primeira, a argamassa deve aderir bem ao suporte, ter coeficiente de condutibilidade térmica idêntico ao do material do suporte e permitir as trocas de humidade entre a alvenaria e o ar exterior. A compatibilidade química passa pela capacidade que o revestimento tem para resistir ao ataque de sais e pela não existência destes no próprio reboco, evitando reações nocivas que contribuam para a degradação do mesmo. A compatibilidade geométrica prende-se com a possibilidade de aplicação da argamassa em espessura suficiente para dissimular defeitos de suporte e corrigir as suas irregularidades. Por fim, a compatibilidade mecânica traduz as características mecânicas bem adaptadas ao suporte, em particular, quando o revestimento é aplicado sobre um suporte de baixa resistência mecânica não deve transmitir tensões elevadas que o possam deteriorar;
- Aspeto estético – condiciona significativamente a aparência global de um edifício, traduzindo-se num requisito de extrema importância. A fendilhação generalizada, as eflorescências e outras manchas de sujidade provenientes, por exemplo, da poluição atmosférica e a falta de regularidade e planeza são exemplos de degradação estética de revestimentos. Além destes, todos os fatores que afetam a durabilidade do revestimento, refletem-se também no seu aspeto estético, a curto ou médio prazo.
- Durabilidade – está relacionada com algumas anomalias tais como: fendilhação, penetração de água por capilaridade, perdas de aderência, ataque de sais, entre outros.

2.1.6 Argamassas de isolamento térmico

De acordo com a NP EN 998-1 (IPQ, 2013), já mencionada neste capítulo, as argamassas para rebocos exteriores e interiores são definidas de acordo com:

- a conceção, como argamassas de desempenho ou de formulação;
- o processo produtivo, como argamassas industriais, industriais semiacabadas ou feitas em obra;

- as propriedades e/ou utilização, como argamassas de uso geral para rebocos exteriores/interiores, leves para rebocos exteriores/interiores, coloridas para rebocos exteriores, monomassa para rebocos exteriores, de renovação para rebocos exteriores/interiores ou de isolamento térmico para rebocos exteriores/interiores.

Como nesta dissertação se pretende conseguir obter uma argamassa de isolamento térmico, no Quadro 2.3 estão resumidos os requisitos que a mesma deve cumprir para adquirir essa classificação.

Quadro 2.3 – Requisitos para obter uma argamassa de isolamento térmico

Parâmetro de ensaio	Requisito para argamassa endurecida
Massa volúmica aparente seca (kg/m^3)	Gama declarada de valores
Resistência à compressão (categorias)	CS I ($0,4-2,5 \text{ N/mm}^2$) a CSI II ($1,5-5,0 \text{ N/mm}^2$)
Aderência (N/mm^2 e padrão de fratura (FP) A, B ou C)	\geq Valor declarado e padrão de fratura (FP)
Absorção de água por capilaridade (categoria) ^{a)}	W 1 ($C \leq 0,40 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$)
Coefficiente de permeabilidade ao vapor de água (μ) ^{a)}	≤ 15
Valores médios de condutibilidade térmica λ (W/m.K) ^{b)}	T1 $\leq 0,10$ T2 $\leq 0,20$
Reação ao fogo	Classe A1
Durabilidade	Avaliada e declarada segundo as disposições válidas no local previsto de utilização da argamassa

a) Para argamassas destinadas a utilizações em elementos exteriores.

b) Para argamassas destinadas a utilizações em elementos sujeitos a requisitos térmicos.

A utilização de argamassas de isolamento térmico pode oferecer benefícios a nível da qualidade dos próprios edifícios, bem como a nível económico, dado que se traduz numa redução de custos inerentes ao consumo energético para aquecimento e arrefecimento. Este último fator reveste-se de grande importância, pois além do referido benefício económico, o benefício a nível ambiental pode ser também relevante na diminuição do consumo de energia.

Além do aproveitamento de resíduos para o fabrico de argamassas verifica-se também uma melhoria no desempenho de edifícios através do uso de argamassas de isolamento térmico. Deste modo, torna-se um pouco mais possível a prática de Construção Sustentável.

2.2 A produção de arroz em Portugal e no Mundo

O arroz (Figura 2.3) é um dos cereais mais consumidos no mundo e é o segundo cereal mais cultivado, apresentando duas subespécies principais, *Indica* e *Japonica*. Acredita-se que surgiu na Índia, de forma selvagem, mas foi na China que se desenvolveu primeiramente a sua cultura de produção. Nos dias de hoje, este cereal cultiva-se em mais de 80 países e é consumido por milhões de pessoas diariamente, sendo o continente asiático o líder de produção (CGIAR, 2015).



Figura 2.3 – Planta do arroz (www.irri.org, 2015)

Em Portugal são produzidos atualmente cerca de 150 milhões de quilos por ano, provenientes do Vale do Tejo, Mondego, Sado, Bacias da Beira Baixa e represas a sul. Este cereal apresenta um ciclo vegetativo de 5 meses, de Maio a Setembro, sendo colhido neste último mês, resultando dois resíduos principais desta atividade: a palha e a casca de arroz. Para o primeiro resíduo conhecem-se dois destinos, é queimado e/ou misturado no solo ou pode também ser vendido em explorações agropecuárias em fardos de forma paralelepípedica. Estes têm um peso aproximado de 18kg e um custo entre 0,80 e 1,00€. A casca de arroz pode ser queimada, sendo este o seu principal destino após o descasque dos grãos, e o seu custo médio por kg é de 0,03€ (Rama, 2014).

A palha de arroz trata-se um material orgânico, similar a um colmo simples, tipo caule. É cilíndrico, com um diâmetro entre 3 a 5 mm e um comprimento de 60 a 85 cm e na sua constituição encontram-se celulose (32%), hemicelulose (29.9%), lignina (18.8%) e outros em menores quantidades. O poder calorífico da palha de arroz é superior a 4254 kcal/kg a seco,

conhecendo-se assim a sua capacidade de gerar energia. No momento da colheita, apresenta um teor de água de 18 a 20% (Murakami et al, 2012).

No caso da casca de arroz, de acordo com Rama (2014), citando outros autores, esta refere-se à capa do grão de arroz com dimensão aproximada de 4 mm e apresenta uma baixa densidade e um baixo peso específico. Além disso, apresenta uma biodegradação muito lenta e trata-se de um material pouco inflamável. O seu tecido lenhoso é formado essencialmente por celulose (50%), lignina (30%) e sílica (20%) e possui um poder calorífico de 3410 kcal/kg (Murakami, et al 2012).

2.2.1 Cultura de arroz no Baixo Mondego

O Baixo Mondego é uma região NUTS III do litoral da região centro de Portugal, compreendendo uma área e cerca de 2062 km² e oito municípios: Coimbra, Cantanhede, Condeixa-a-Nova, Figueira da Foz, Montemor-o-Velho, Penacova e Soure. O rio Mondego é um elemento natural marcante de toda a região centro, particularmente na zona do Baixo Mondego, e a sua bacia hidrográfica estende-se desde a Serra da Estrela à Figueira da Foz. De entre os importantes ativos naturais que existem devido à presença do rio, destaca-se a vasta área fértil e de vocação agrícola dos campos do Mondego (Ribeiro & Chorincas, 2011).

O cultivo do arroz foi introduzido na região do Baixo Mondego no reinado de D. Dinis (1279-1325), representando, nos dias de hoje, uma área que ocupa mais de 50% da área total agrícola da região, ocupando cerca de 6000 hectares e um número de agricultores que ronda os 6.300, sem incluir os respetivos agregados familiares que fazem com que o número de indivíduos dependentes desta atividade seja superior. Resultam anualmente lucros de aproximadamente 6.000.000,00€ (Rama, 2014).

Os resíduos resultantes desta atividade e o seu principal destino já foram mencionados anteriormente e refira-se que na zona do Baixo Mondego resultam 21.000 toneladas de palha, que é colhida em Setembro e Outubro, e 6.000 toneladas de casca (Martins, T., 2015).

2.3 Argamassas com casca e palha de arroz

O conceito de utilização destes resíduos em materiais de construção já deu origem a outros trabalhos, tais como “Eco-painéis construídos a partir de madeira e resíduos de palha/casca de arroz” (Rama, 2014) e “Estudo do comportamento de argamassas com incorporação de casca/palha de arroz” (Martins, T., 2015). Neste último trabalho pretendia-se aferir a

viabilidade económica e ecológica do conceito e apresentam-se no parágrafo seguinte algumas conclusões retiradas.

Foram recolhidas amostras de casca e palha de arroz e produzidas três tipos de argamassas: argamassas leves (constituídas por ligante, casca e água), argamassas com casca de arroz (ligante, areia, casca e água) e argamassas de palha (ligante, areia, palha e água). Fez-se a comparação entre estes três tipos de argamassas com traços volumétricos diferentes e as argamassas de referência (de ligante, areia e água). Foram caraterizadas através de ensaios experimentais após uma cura de 28 dias e após um processo de envelhecimento acelerado. Resumidamente, concluiu-se que a argamassa leve com casca de arroz tem uma fraca resistência mecânica para ser aplicada com uma argamassa de revestimento vulgar, no entanto, exhibe benefícios térmicos se for aplicada como placa de isolamento térmico. A argamassa com palha de arroz apresenta também resistências mecânicas muito baixas mas bons resultados de condutibilidade térmica. Por último, a argamassa com casca de arroz apresenta propriedades funcionais aceitáveis e com significativas potencialidades térmicas. No entanto, nenhuma das argamassas estudadas pôde ser classificada como uma argamassa térmica.

3. MATERIAIS E TÉCNICAS

3.1 Caraterização das matérias-primas

Toda a atividade experimental levada a cabo para este trabalho foi realizada no ITeCons – Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção.

As matérias-primas utilizadas para a produção das argamassas foram a areia de rio como agregado, palha de arroz e casca de arroz, cimento como ligante, hidrófugo de massa com efeito plastificante como adjuvante, e água. A adição do hidrófugo pretendeu melhorar caraterísticas das argamassas obtidas por Martins, T. (2015).

A areia de rio encontrava-se armazenada em laboratório (Figura 3.1). Esta apresentava-se limpa e sem impurezas que pudessem afetar os resultados e para analisar as suas caraterísticas fez-se a análise granulométrica por peneiração e o ensaio de baridade.



Figura 3.1 – Areia de rio (Martins, T., 2015)

A palha de arroz e a casca utilizadas são resíduos do cultivo de arroz do Baixo Mondego, da espécie *Oryza sativa L.*, subespécie *Japonica*, que se encontravam também armazenadas em laboratório.

A palha possuía um comprimento médio de 60 cm e um diâmetro médio de 5 mm e foi sujeita a trituração para ser incorporada na argamassa. Numa primeira fase, a palha foi cortada manualmente com recurso a uma tesoura, para facilitar a fase seguinte que consistiu na trituração com recurso a um moinho apropriado (Figura 3.2) até passar no crivo de 4 mm. Por fim, uma parte dessa palha já triturada é moída até passar no crivo de 1 mm.



Figura 3.2 – Moinho utilizado para triturar a palha de arroz

Refira-se que antes de se proceder à moagem da palha com recurso ao moinho, esta foi mantida na estufa a $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante cerca de 60 horas, de modo a ficar completamente seca. Desta forma, obtêm-se duas dimensões diferentes, denominadas por palha grossa (4 mm) e palha fina (1 mm), como se pode observar na Figura 3.3.

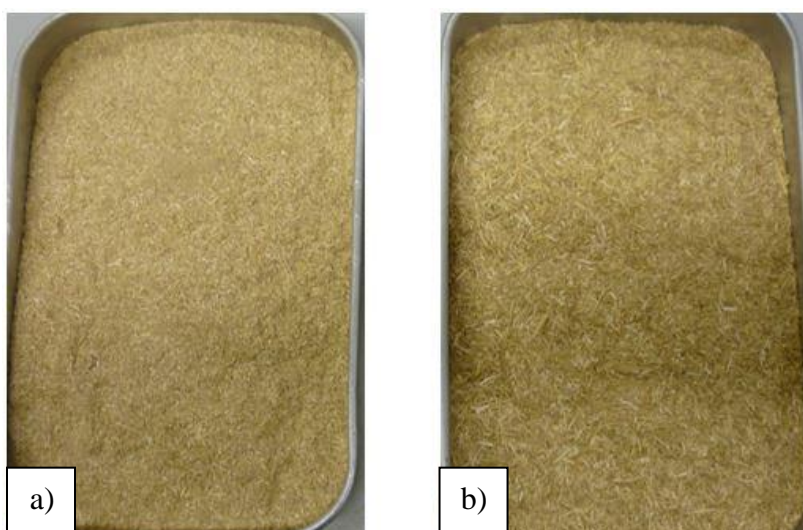


Figura 3.3 – Palha moída. a) Palha fina; b) Palha grossa

Em relação à casca de arroz, esta detinha uma dimensão média entre os 3 e os 5 mm, não sofrendo qualquer processo de transformação prévio (Figura 3.4).



Figura 3.4 – Casca de arroz (Martins, T., 2015)

O cimento utilizado foi do tipo CEM II/B-L 32,5N, das indústrias CIMPOR, armazenado em saco de papel.

Tal como para a areia, a palha fina e grossa, a casca e o cimento foram sujeitos ao ensaio de baridade.

Além destes materiais, utilizou-se ainda o adjuvante HED – Hidrófugo e Plastificante para Argamassas, que se trata de um hidrófugo de massa com efeitos secundários plastificantes, da marca Labo Portugal, adicionado em percentagem da massa de ligante.

3.1.1 Análise granulométrica por peneiração

A análise granulométrica da areia já tinha sido executada previamente em laboratório no âmbito de outras dissertações, usando a série de peneiros de malha quadrada normalizados especificada, ou seja, 0,063, 0,125, 0,500, 1,00, 2,00, 4,00 [mm]. Este ensaio separa um material em múltiplas classes granulométricas e para a areia, a dimensão máxima da abertura do peneiro é de 4mm. Assim, é possível determinar a quantidade de cada uma das frações dimensionais do material, resultando a curva granulométrica.

A areia foi colocada em estufa a cerca de 110°C até atingir massa constante. Os peneiros (Figura 3.5) colocaram-se uns em cima dos outros, por ordem crescente da dimensão das aberturas, com o peneiro de maior abertura no topo e o de menor no fundo da sequência. Os peneiros foram agitados, um de cada vez, começando no de maior abertura para o de menor. O material retido foi pesado numa balança com precisão de 0,01g.



Figura 3.5 – Peneiros utilizados (Raimundo, 2013)

A caraterização granulométrica da areia foi obtida com recurso à equação:

$$\text{Percentagem cumulativa de material passado} = \left(100 - \frac{R_i}{M_1}\right) \times 100 \quad (3.1)$$

Com:

M_1 – massa inicial da amostra seca [g];

R_i – massa do material retido em cada peneiro [g].

3.1.2 Determinação da baridade dos materiais

A determinação da baridade dos materiais foi efetuada de acordo com a norma NP EN 1097-3:2002 (IPQ, 2002). Usou-se um recipiente com uma massa de 1343,28g e volume de 1028,30 cm³. O procedimento descrito seguidamente foi efetuado da mesma forma para a palha grossa e fina e para o cimento, uma vez que para a areia e para a casca recorreu-se aos resultados de Martins, T. (2015).

Utilizando uma pá, o material foi deixado cair de uma altura fixa acima do recipiente. Removeu-se o material excedente com a ajuda de uma régua metálica, com o cuidado de não compactar a amostra (Figura 3.6). Seguidamente pesou-se o recipiente contendo o material numa balança com precisão de 0,01g, registando-se o valor obtido. Este procedimento é feito três vezes para cada constituinte e o cálculo da baridade resulta da média dos três valores obtidos, recorrendo à seguinte equação:

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (3.2)$$

Onde:

ρ_b – baridade do material [g/cm³];

m_1 – massa do recipiente vazio [g];

m_2 – massa do recipiente com material [g];

V – capacidade do recipiente [cm^3].



Figura 3.6 – Eliminação do excesso de material (Martins, T., 2015)

3.2 Preparação das argamassas

Neste trabalho foram definidas 4 misturas distintas de argamassas, com traço volumétrico de 1:2,5 (cimento:agregado). Desta forma, resultaram a argamassa de referência (AR), argamassa com casca de arroz (ACA), argamassa com palha de arroz grossa (APAG) e fina (APAF). Note-se que os traços apresentados no Quadro 3.1 para as argamassas com incorporação de resíduos têm por base o trabalho de Martins, T. (2015), tendo-se utilizado traços semelhantes.

Quadro 3.1 – Caraterização das argamassas

Designação	Composição	Traço volumétrico	Relação água/ligante
AR	(Cimento:Areia)	1:2,5	0,606
ACA	(Cimento:Areia:Casca)	1:0,5:2	0,798
APAF	(Cimento:Areia:Palha)	1:0,7:1,5	1,197
APAG	(Cimento:Areia:Palha)	1:0,7:1,5	0,791

Todos os componentes sólidos da mistura foram pesados numa balança com precisão de 0,01g, de acordo com os traços volumétricos apresentados no quadro anterior. Estes foram colocados num balde e misturados secos, utilizando um berbequim de vareta helicoidal, e posteriormente foi-se adicionando água, que continha o adjuvante em quantidade adequada, à exceção de AR que não continha adjuvante. Ainda com o auxílio do mesmo berbequim, a mistura foi efetuada até se verificar homogeneidade e inexistência de grumos.

A quantidade de material utilizado para cada formulação foi previamente calculada mediante os provetes necessários para realizar os ensaios descritos mais adiante. Primeiramente determinou-se a consistência por espalhamento (descrito no subcapítulo 3.3.1) e depois preencheram-se os moldes:

- 24 moldes prismáticos com 160x40x40 [mm], em moldes metálicos triplos, obtendo-se 6 provetes prismáticos de cada tipo de argamassa. Estes foram preenchidos com recurso a uma colher de pedreiro, e compactados numa mesa compactadora através da aplicação de 25 pancadas quando preenchidos até meia altura e depois um número igual de pancadas quando preenchidos na sua totalidade;
- 20 moldes circulares com cerca de 106 mm de diâmetro e 15 mm de altura para testar 5 provetes circulares de cada tipo de argamassa. Estes moldes, obtidos a partir de tubos de PVC, foram preenchidos com a mesma colher e compactados manualmente com um pequeno pilão, aplicando cerca de 10 pancadas manualmente, e a sua superfície foi nivelada com uma régua metálica;
- 12 moldes prismáticos com 150x150x40 [mm], resultando 3 provetes para cada argamassa diferente. O seu preenchimento e compactação foram semelhantes aos dos moldes circulares e a sua superfície foi nivelada do mesmo modo.

Aplicou-se previamente óleo descofrante em todos os moldes e depois de preenchidos com as misturas, foram colocados em condições de humidade e temperatura controladas. Nos primeiros 7 dias, estiveram condicionados a $95\% \pm 5\%$ de humidade relativa e $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura, dentro de sacos de plástico devidamente vedados. Depois desse período os provetes foram retirados dos sacos, desmoldados e mantidos, até à data de ensaio, a uma temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e HR $65\% \pm 5\%$, resultando num período de cura de 28 dias.

3.3 Ensaio sobre as argamassas no estado fresco

3.3.1 Ensaio de consistência por espalhamento

Uma vez que a consistência de uma argamassa pode avaliar a sua trabalhabilidade, este parâmetro é muito importante pois, como referido no subcapítulo 2.1.5, as argamassas devem poder ser aplicadas facilmente, possibilitando uma boa aderência, compacidade e bom rendimento.

Para a realização deste ensaio, recorreu-se à norma EN 1015-3:1999 (CEN, 1999). Nesta, é referido que “a consistência por espalhamento é uma quantificação da fluidez de determinada

argamassa, dando indicação sobre a deformabilidade da mesma quando submetida a determinado tipo de tensão” e é dada pelo diâmetro médio da argamassa no estado fresco. Para determinar a consistência da argamassa utilizou-se uma mesa de espalhamento (Figura 3.7) com um molde metálico de forma tronco-cônico. Todo o material foi limpo com um pano humedecido antes de cada ensaio. Na superfície do disco (referência 5 da legenda da Figura 3.7) está gravado um círculo com 100 mm de diâmetro e 0,5 mm de profundidade onde é centrado o molde. Depois desta centragem, a argamassa foi colocada no interior do mesmo, em duas fases, com o auxílio de uma espátula. Numa primeira fase, encheu-se até ficar meio preenchido e depois foram aplicadas 10 pancadas ligeiras com um pilão, assegurando um enchimento uniforme. Na segunda fase, preencheu-se todo o molde até passar o topo, repetiram-se as 10 pancadas e rasou-se o topo, retirando o excesso de argamassa. O molde foi retirado e rodou-se a manivela do aparelho de modo a serem aplicadas 15 pancadas normalizadas, com intervalos de 1 segundo, verificando-se o espalhamento da argamassa. Recorrendo a um paquímetro digital mediu-se o diâmetro do material espalhado em duas direções perpendiculares e registaram-se os valores obtidos. Considerou-se como o diâmetro do espalhamento a média entre esses dois valores.

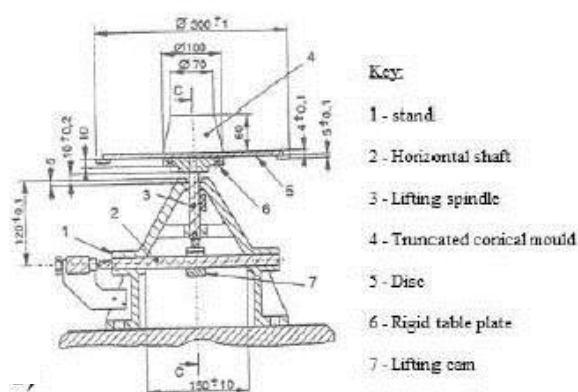


Figura 3.7 – Mesa de espalhamento (CEN, 1999)

Segundo a referida norma, se os dois valores do diâmetro obtidos em cada ensaio se desviarem menos de 10% do seu valor médio, então pode assumir-se esse valor como correto e considera-lo a consistência da argamassa. Caso contrário, a quantidade de água presente na argamassa deve ser corrigida e o procedimento do ensaio deve ser repetido.

O valor de referência do espalhamento, respeitando a indicação dos 10% de desvio, é de 150 mm \pm 10 mm, ou seja, um intervalo de valores entre os 140 e os 160 mm.

3.4 Ensaios sobre as argamassas no estado endurecido

3.4.1 Ensaio de resistência à tração por flexão

Este ensaio foi efetuado segundo a norma EN 1015-11:1999 (CEN, 1999). Cada provete foi colocado num equipamento adequado apoiado sobre dois apoios, posicionando a face que não esteve em contacto com o molde metálico voltada para o utilizador. Aplicou-se uma carga a taxa constante, sujeitando a amostra a um esforço de flexão, até atingir a rotura (Figura 3.8).

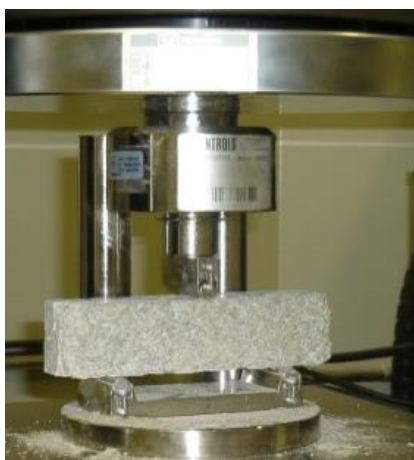


Figura 3.8 – Ensaio de resistência à tração por flexão

A resistência à flexão calculou-se através da equação:

$$R_F = 1,5 \times \frac{F \times l}{b \times d^2} \quad (3.3)$$

Sendo:

R_F – resistência à flexão [N/mm^2];

F – carga máxima aplicada [N];

l – distância entre os eixos de apoio do provete [100 mm];

b – largura do provete [40 mm];

d – espessura do provete [40 mm].

Trata-se de um ensaio destrutivo e as metades (Figura 3.9) foram usadas para realizar o ensaio de resistência à compressão e o ensaio de absorção de água por capilaridade, descritos adiante neste capítulo.



Figura 3.9 – Metades resultantes do ensaio de resistência à tração por flexão

3.4.2 Ensaio de resistência à compressão

Este ensaio seguiu o indicado na norma 1015-11:1999 (CEN, 1999) e, como mencionado anteriormente, utilizou-se uma das metades resultantes do ensaio de resistência à flexão. Colocou-se o provete no equipamento adequado, apoiado sobre um apoio, de forma que um dos lados fique para fora do apoio cerca de $16 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ (Figura 3.10). As faces em contacto com o apoio e a aplicação da carga estiveram em contacto com o molde metálico durante a cura.



Figura 3.10 – Ensaio de resistência à compressão

Aplicou-se uma carga a taxa constante até se atingir a rotura e quando tal aconteceu a parte do provete que estava fora do apoio separou-se do restante. Estas partes que se separaram mantêm a sua integridade pelo que foram recolhidas e aproveitadas para o ensaio de determinação da porosidade aberta.

A resistência à compressão foi calculada usando a equação:

$$R_c = \frac{F}{A_c} \quad (3.4)$$

Em que:

R_c – resistência à compressão [N/mm^2];

F – carga máxima aplicada [N];

A_c – área de carga [1600 mm^2].

3.4.3 Ensaio de determinação da porosidade aberta e massa volúmica aparente

A porosidade aberta determina-se através do quociente entre o volume de poros abertos e o volume aparente do provete e é avaliada em forma percentual. Este conceito traduz a quantidade de poros que estão acessíveis à água pela fronteira exterior do provete e que comunicam entre si, permitindo a circulação de fluidos no seu interior. Portanto, quando um material apresenta porosidade aberta é de fácil embebição e, por outro lado, se a porosidade for fechada existe uma barreira hídrica (Freitas et al, 2008) (Figura 3.11).

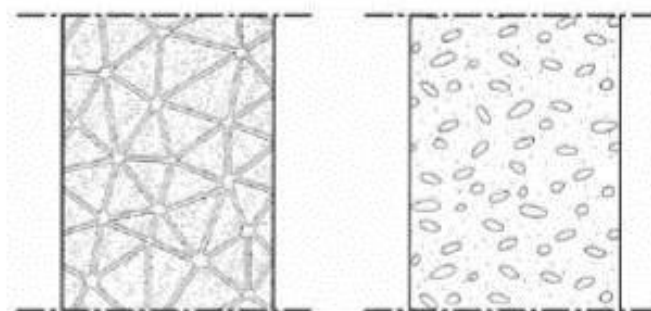


Figura 3.11 – Distinção entre um material com porosidade aberta e outro com porosidade fechada (Freitas et al, 2008)

Este ensaio baseou-se na norma NP EN 1936:2008 (IPQ, 2008) que se aplica a pedra natural, não sendo totalmente adaptado a argamassas. Devido a este facto, foram feitas pequenas alterações nos procedimentos.

Os provetes ensaiados foram os topos íntegros dos provetes que sobraram do ensaio de resistência à compressão (Figura 3.12), tendo sido previamente identificados e limpos, retirando cuidadosamente o material que, naturalmente, se desagregava devido à sua fragilidade.



Figura 3.12 – Provetes para determinação da porosidade aberta

Antes de dar início ao ensaio, as amostras foram colocadas numa estufa ventilada a uma temperatura de $70^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, durante cerca de 48 horas até se verificar variação de massa inferior a 0,1% entre pesagens efetuadas num intervalo de 24 horas. Este procedimento assegura que as amostras estavam completamente secas antes do início do ensaio. Por fim, pesa-se cada uma numa balança com precisão de 0,001g.

Os provetes foram colocados num tabuleiro ao qual se adicionou água até que todos se encontrassem completamente imersos. Deixaram-se em repouso durante cerca de 24 horas para que atingissem a saturação. Note-se que segundo a referida norma, os provetes deveriam ser colocados num recipiente de vácuo e sujeitos a um abaixamento de pressão de modo a eliminar o ar contido nos poros abertos e ficar imersos nestas condições durante determinado período de tempo. Este procedimento não foi levado a cabo devido à fragilidade dos provetes, correndo-se o risco de desagregação completa dos mesmos.

Após a saturação, os provetes foram pesados numa balança com precisão de 0,01g, determinando-se a massa saturada de cada um. Neste processo foi necessário ter cuidado no seu manuseamento uma vez que antes da pesagem foram limpos com um pano seco de forma a retirar o excesso de água.

Por fim, procedeu-se à pesagem hidrostática. Para este efeito, usou-se uma balança apropriada que possui uma grelha metálica presa à mesma, que imerge dentro de um recipiente cheio de água, como se pode verificar na Figura 3.13. Colocou-se cada amostra na grelha imersa e registou-se a massa obtida, após estabilização do seu valor. Esta estabilização é importante pois a ondulação provoca alguma instabilidade nas medições.



Figura 3.13 – Balança para pesagem hidrostática

O cálculo da porosidade aberta, ρ_0 , foi feito através da expressão:

$$\rho_0 = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \times 100 \quad (3.5)$$

Com:

ρ_0 – porosidade aberta [%];

m_d – massa do provete seco [g];

m_s – massa do provete saturado [g];

m_h – massa do provete imerso em água [g].

Determinou-se ainda o valor da massa volúmica aparente, ρ_b , recorrendo à expressão:

$$\rho_b = \frac{m_d}{m_s - m_h} \times \rho_{rh} \quad (3.6)$$

Onde:

ρ_b – massa volúmica aparente [kg/m^3];

ρ_{rh} – massa volúmica aparente da água, à temperatura de ensaio, 20°C, [998 kg/m^3].

3.4.4 Ensaio de absorção de água por capilaridade

A absorção por capilaridade apresenta uma ligação com a porosidade aberta e a capilaridade define-se como o processo de penetração de água de um material poroso, quando entra em contacto com a mesma, no estado líquido. Segundo Torres (2004), a maioria dos materiais utilizados na construção civil são materiais porosos, havendo comunicação entre os seus

poros. Isto leva à possibilidade de fixação de humidade nos materiais, resultando em modificações das suas características físicas, do ponto de vista mecânico e térmico.

Este ensaio realizou-se segundo as normas EN 1015-18:2002 (CEN, 2002) e EN 15801:2009 (BSI, 2009). Foram utilizadas as metades resultantes do ensaio de resistência à tração por flexão, com dimensões aproximadas de 40x40 [mm]. Antes de se iniciar o ensaio, as amostras foram colocadas numa estufa ventilada, a uma temperatura de $65^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante aproximadamente 48 horas, até se verificar uma variação de massa inferior a 0,1% entre pesagens efetuadas num intervalo de 24 horas. Após o período de secagem, foram pesadas numa balança com precisão de 0,001g, registando-se o seu peso seco.

Posteriormente preparou-se uma tina metálica própria para este ensaio, que tinha no fundo uma malha plástica que minimizava a área de contacto dos provetes com o fundo do tanque, permitindo um melhor contacto com a água e mantendo a base dos provetes o mais exposta possível à absorção de água. Os provetes foram colocados com a face quebrada virada para cima, apesar de na norma mencionada ser aconselhada a colocação da face que sofreu rotura em contacto com a água. Procedeu-se deste modo uma vez que a face quebrada tinha uma menor área de sustentação e muito irregular, correndo-se o risco de queda do provete e comprometendo todo o ensaio.

Encheu-se a tina com água até uma altura de cerca de 5 mm, respeitando o intervalo indicado na norma de 5 a 10 mm. No decorrer do ensaio o nível da água foi sempre verificado, garantindo uma altura de água constante.

As faces laterais dos provetes foram revestidas com película aderente de modo a que a absorção se verificasse apenas pela base, ou seja, de forma a terem um fluxo unidirecional da água absorvida. Procedeu-se à pesagem dos provetes, numa balança com precisão de 0,001g, e posteriormente colocaram-se na tina, em cima da malha plástica (Figura 3.14). A tampa da tina manteve-se fechada de forma a garantir um ambiente saturado no seu interior, ou seja, com uma humidade relativa de $95\% \pm 5\%$.

Foram efetuadas pesagens dos provetes aos 5, 10, 15, 30 min, 1h, 1,5h, 2h e 3h após o início da exposição à água e depois a cada 24 horas, até se atingir massa constante, ou seja, até se verificar uma diferença de massa inferior a 0,1% entre duas pesagens diárias consecutivas. Neste aspeto, mais uma vez, não foi cumprida a norma rigorosamente, pois esta indica que se devem fazer pesagens apenas aos 10 e 90 minutos após o contacto com a água. Os intervalos adotados permitem determinar com precisão a evolução da absorção de água nas amostras,

pois esta ocorre mais rapidamente nos primeiros instantes. As pesagens foram feitas numa balança com precisão de 0,001g.

Para proceder às pesagens dos provetes, foi necessário manuseá-los com cuidado devido à sua fragilidade e o excesso de água da base foi limpo com um pano seco. Note-se que ao retirar cada amostra, não se deve salpicar os restantes provetes para não influenciar os resultados. Além disso, a pesagem deve ser um procedimento rápido para manter as amostras em ambiente saturado, como é requerido.

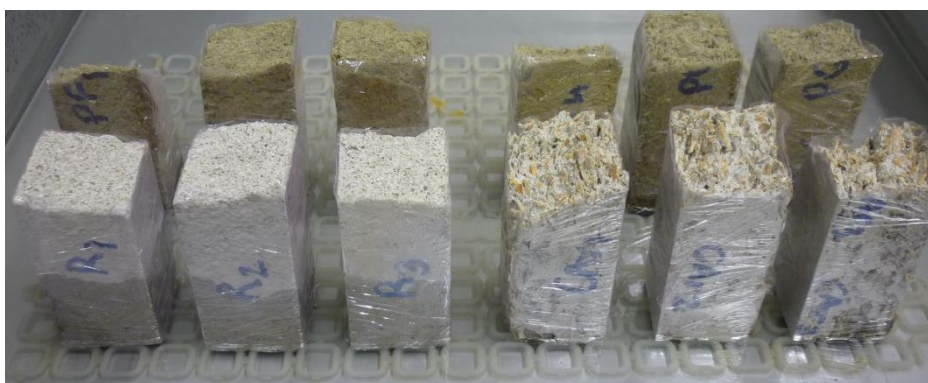


Figura 3.14 – Ensaio de absorção por capilaridade

Determinou-se para cada amostra a quantidade de água absorvida por unidade de superfície:

$$M_i = \frac{m_i - m_0}{A} \quad (3.7)$$

Sendo:

M_i – quantidade de água absorvida por unidade de superfície [kg/mm^2];

m_i – massa do provete ao fim de determinado tempo [kg];

m_0 – massa do provete seco [kg];

A – secção do provete em contacto com a água [$40 \times 40 \times 10^{-3} \text{ m}^2$].

Para cada tipo de argamassa foram ensaiados 3 provetes, pelo que a quantidade de água absorvida, M_i , para determinado tipo de argamassa, corresponde à média dos M_i .

De acordo com a norma EN 1015-18:2002 (CEN,2002), o coeficiente de absorção, C , que expressa a velocidade de absorção de água por parte da argamassa é dado por:

$$C = 0,1 \times (M_{90} - M_{10}) \quad (3.8)$$

Em que:

C – coeficiente de absorção [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$];

M_{90} – massa do provete aos 90 minutos após o início do ensaio [kg];

M_{10} – massa do provete aos 10 minutos após o início do ensaio [kg].

3.4.5 Ensaio de secagem

A permanência de água no interior das argamassas acelera a sua degradação, como tal, o ensaio de secagem é muito importante para determinar a capacidade que a argamassa possui de eliminar essa água. Após o ensaio de absorção por capilaridade deu-se início ao ensaio de secagem, uma vez que os provetes se encontravam saturados.

Tal como no ensaio que precedeu a secagem, a película aderente foi mantida nos provetes para simular secagem também unidirecional. Durante o ensaio, os provetes foram mantidos numa câmara climática com uma temperatura de $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ e humidade relativa de $50\% \pm 5\%$. Foram efetuadas pesagens de hora a hora durante as primeiras 6 horas, passando depois para pesagens com intervalos de 24 horas até se verificar massa constante, ou seja, uma variação de massa em 24 horas inferior a 1 %. As pesagens foram efetuadas rapidamente de modo a retirar os provetes das condições de temperatura e humidade relativa referidas o mínimo tempo possível. Utilizou-se uma balança com precisão de 0,001 g.

Os resultados deste ensaio traduzem-se através da curva de secagem, que mostra a relação entre o tempo e o teor de água, e do índice de secagem, que exprime a rapidez se secagem das argamassas sendo tanto maior quanto menor for o índice. O teor em água é determinado pela seguinte expressão:

$$W_t = \frac{m_t - m_0}{m_0} \times 100 \quad (3.9)$$

Com:

W_t – teor em água [%];

m_i – massa do provete no instante t [g];

m_0 – massa do provete seco em estufa [g].

O índice de secagem é dado por:

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^n [(t_i - t_{i-1}) \times \frac{Q_{i-1} + Q_i}{2}]}{Q_{\text{máx}} \times t_f} \quad (3.10)$$

Onde:

IS – índice de secagem;

t_i – tempo de ensaio no instante i [h];

Q_i – quantidade de água no interior do provete no instante i [%];

$Q_{máx}$ – quantidade de água no interior do provete no instante inicial [%];

t_f – tempo final do ensaio [h].

Sendo:

$$Q_i = \frac{m_i - m_{seca}}{m_{seca}} \times 100 \quad (3.11)$$

Em que:

m_i – massa do provete no instante inicial [g];

m_{seca} – massa do provete seco [g].

3.4.6 Ensaio de permeabilidade ao vapor de água

A permeabilidade ao vapor de água de uma envolvente exterior contribui para melhorar o conforto higrotérmico dos edifícios e quanto maior for este parâmetro, maior será a evaporação da água infiltrada nos paramentos (Veiga, 1998).

Este ensaio foi executado com base nas normas NP EN 1015-19:2008 (IPQ, 2008), que se aplica a argamassas de reboco endurecidas, e ISO 12572:2001 (ISO, 2001), utilizada em materiais de construção de diversas origens. Com este ensaio determina-se a quantidade de vapor de água que se difunde através da argamassa, quando sujeita a uma variação de pressão entre as duas faces.

Na norma ISO 12572:2001, recomenda-se uma área de superfície exposta de pelo menos $0,005 \text{ m}^2$ e 5 provetes ensaiados quando essa mesma área é inferior a $0,02 \text{ m}^2$, sendo cumpridos ambos os critérios. Para superfícies com área não inferior a $0,02 \text{ m}^2$ bastava ensaiar-se apenas 3 provetes.

O procedimento deste ensaio consiste em colocar os provetes entre dois ambientes com temperaturas idênticas mas pressões de vapor parciais diferentes para que o gradiente de pressão criado origine um fluxo de vapor constante através dos mesmos.

Após se retirarem as amostras dos moldes de PVC aplicou-se uma camada de material impermeabilizante em toda a superfície lateral dos mesmos para conseguir que a passagem de vapor se faça apenas pela superfície, criando-se um fluxo unidirecional. Depois da secagem do impermeabilizante durante algumas horas, colou-se uma tira de fita aderente sobre o mesmo e colocaram-se os provetes sobre tinas de vidro, preenchidas com água até uma altura de 15mm da base do provete, simulando humidade relativa de 100% no interior. Com o

mesmo tipo de fita aderente, solidarizou-se o provete de argamassa à tina e cobriu-se com parafina líquida, tornando estanque o conjunto provete/tina (Figura 3.15).



Figura 3.15 – Conjunto provete/tina para ensaio de permeabilidade ao vapor de água

As 20 amostras (5 para cada tipo de argamassa) foram colocadas numa câmara climática em condições de temperatura e humidade relativa de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $50\% \pm 5\%$ HR. Desta forma, o fluxo de vapor de água desenvolveu-se do interior das tinas para o exterior devido à pressão no interior ser superior. Note-se que o manuseamento dos provetes foi feito de forma cuidadosa para que a água no interior da tina não entrasse em contacto com a argamassa, de modo a não comprometer os resultados do ensaio.

Foram efetuadas pesagens diárias, recorrendo a uma balança com precisão de 0,001g, até que a variação da massa dos provetes durante o intervalo de tempo decorrido fosse constante durante 5 medições consecutivas. Esta condição verificou-se para uma variação inferior a 5% do valor médio da variação para cada provete. A relação entre a variação de massa e tempo é dada por:

$$\Delta m_{12} = \frac{m_1 - m_2}{t_1 - t_2} \quad (3.12)$$

Com:

Δm_{12} – relação entre a variação de massa e o tempo [kg/s];

m_1 – massa do conjunto provete/tina no instante t_1 [kg];

m_2 , massa do conjunto provete/tina no instante t_2 [kg];

t_1 e t_2 – tempos referentes a duas pesagens [s].

Quando se obtém uma variação constante de Δm_{12} , este valor é assumido como o valor de fluxo de difusão de vapor de água, G . Através deste valor, determinou-se o valor da densidade de fluxo de difusão de vapor, tal que:

$$g = \frac{G}{A} \quad (3.13)$$

Onde:

g – densidade de fluxo de difusão de vapor [$\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$];

G – fluxo de difusão de vapor de água [kg/s];

A – área exposta do provete (média aritmética entre as áreas das superfícies livres inferior e superior do provete) [m^2].

A permanência ao vapor de água, W [$\text{Kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}$] é dada por:

$$W = \frac{g}{\Delta p_v} \quad (3.14)$$

Sendo:

$$\Delta p_v = p_{sat} \times \frac{\phi_1 - \phi_2}{100} \text{ [Pa]} \quad (3.15)$$

E:

$$p_{sat} = 610,5 \times e^{\frac{17,269 \times \theta}{273,3 + \theta}} \quad (3.16)$$

em que:

p_{sat} – pressão de saturação à temperatura do ensaio [Pa];

$\phi_1 - \phi_2$ – diferença entre as humidades relativas no interior e exterior da tina de ensaio [%];

θ – temperatura à qual decorre o ensaio [$^{\circ}\text{C}$].

Como se considera uma temperatura de ensaio de 22°C , obtém-se $p_{sat} = 2642$ Pa. Tendo em conta que a humidade relativa no interior da tina e na câmara climática onde decorreu o ensaio é de aproximadamente 100% e 50%, respetivamente, a diferença de humidade relativa no interior e exterior da tina é de 50%. Então, o valor de Δp_v é de 1321,2 Pa.

A permeabilidade ao vapor de água consegue-se através de:

$$\delta = W \times d \quad (3.17)$$

Com:

δ – permeabilidade ao vapor de água [$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$];

d – espessura do provete [m].

Foram ainda determinados o valor do fator de resistência à difusão do vapor de água e a espessura da camada de ar equivalente. O primeiro indica quantas vezes a resistência à difusão de um material é maior que a de uma camada de ar em repouso, de igual espessura e

sujeita às mesmas condições ambientais e a espessura da camada de ar equivalente representa a espessura da camada de ar em repouso que possui a mesma resistência à difusão do vapor de água que o elemento construtivo existente (Freitas et al, 2008).

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} \quad (3.18)$$

Onde:

μ – fator de resistência à difusão de vapor de água;

δ_a – coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do ar [$1,95 \times 10^{-10}$ kg/(m.s.Pa)];

δ – permeabilidade ao vapor de água [kg/(m.s.Pa)].

E:

$$s_d = \mu \times d \quad (3.19)$$

Sendo:

S_d – espessura da camada de ar equivalente [m];

d – espessura do provete [m].

3.4.7 Ensaio para determinação da condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica de um material é o fluxo de calor que atravessa, na perpendicular à sua superfície, um elemento com 1 m^2 de secção e espessura de 1m, quando a diferença de temperatura entre as faces é de 1°C , sendo as duas faces planas e paralelas (Torres, 2004).

Para levar a cabo este ensaio, recorreu-se à norma EN 12664:2001 (CEN, 2001) e ao equipamento λ -Meter EP500 (Figura 3.16)



Figura 3.16 – Equipamento λ -Meter EP500

Os provetes utilizados apresentavam dimensões de 150x150x40 [mm] e foram testados 3 provetes para cada tipo de argamassa. Estes foram previamente pesados e condicionados numa estufa a $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ até atingirem massa constante e depois colocados num exsicador para arrefecerem sem ganharem humidade. Por fim, os provetes foram envolvidos com um material plástico para evitar alterações de massa e humidade (Figura 3.17).



Figura 3.17 – Provete para ensaio de determinação da condutibilidade térmica

O equipamento λ -Meter EP500 permite determinar a condutibilidade térmica e a resistência térmica de um material, através do método da placa quente protegida. A temperatura média estipulada no equipamento é de 23°C com uma diferença entre os pratos do mesmo de 15°C . Cada provete foi centrado no aparelho e submetido a essa diferença de temperatura, sendo as trocas de calor efetuadas por condução. A maior face do provete era a que se encontra em contacto com os pratos e deve ser plana, caso contrário, aplica-se massa consistente para conseguir essa planeza. Note-se que a pressão mínima entre os pratos e o provete é de 0,5 kPa para garantir um contacto adequado para a realização do ensaio. Além disso, foram colocadas fibras de *polyester* para que a temperatura de ensaio não fosse influenciada (Figura 3.18).

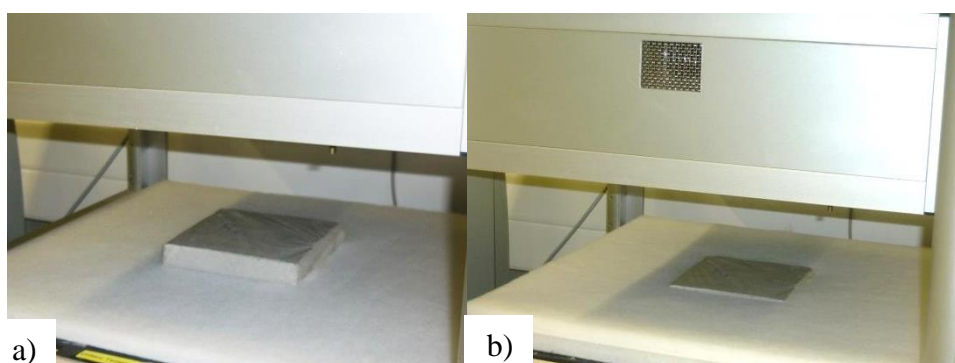


Figura 3.18 – Preparação do ensaio para determinação da condutibilidade térmica. a) e b)

Provete centrado no equipamento, envolvido por fibra de *polyester*

Durante o ensaio, a condutibilidade térmica foi medida a cada 30 segundos até que esse valor estabilizasse, ou seja, até que a variação fosse inferior a 1% num intervalo de tempo de 75 minutos. Esse valor foi calculado com base na expressão:

$$\lambda = \frac{Q \times d}{A \times \Delta T} \quad (3.20)$$

Em que:

λ – condutibilidade térmica [W/m.°C];

Q – fluxo de calor [W/m²];

d – espessura do provete [m];

A – área de medição [m²];

ΔT – diferença de temperaturas [°C].

A resistência térmica é calculada pela equação:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (3.21)$$

Com:

R – resistência térmica [m².°C /W];

λ – condutibilidade térmica [W/m.°C];

d – espessura do provete [m].

4. RESULTADOS

No presente capítulo pretende-se expor e analisar os resultados obtidos dos ensaios descritos anteriormente, comparando os resultados das argamassas com incorporação de resíduos, ACA, APAF e APAG, com AR. Além disso, procura-se fazer um paralelismo com os resultados obtidos por Martins, T. (2015), pois como já foi referido no subcapítulo 1.2, esta dissertação dá continuidade ao trabalho desenvolvido pelo mesmo, que realizou todos os ensaios que aqui se apresentaram. O mesmo autor testou argamassas com incorporação de casca de arroz e palha grossa, a palha fina utilizou-se apenas neste trabalho, e testou também uma argamassa leve de casca de arroz (sem agregado). Esta última não é alvo de qualquer comparação neste capítulo, pois todas as argamassas produzidas têm areia na sua constituição, logo, não seria coerente fazer comparação de resultados com uma argamassa sem areia. Outra diferença relevante reside no tipo de cimento utilizado. Neste estudo usou-se cimento CEM II/B-L 32,5N e Martins, T. (2015) utilizou cimento CEM II/A-L 52,5N.

Martins, T. (2015) procurou também conseguir uma argamassa térmica testando vários traços para cada tipo de argamassa. As de palha de arroz revelaram-se muito fracas no ponto de vista da resistência mecânica, absorveram maiores quantidades água durante o ensaio de absorção por capilaridade mas exibiram boas propriedades térmicas. Por outro lado, as argamassas de casca apresentaram uma resistência mecânica satisfatória, uma absorção de água e secagem semelhantes a AR mas valores de permeabilidade ao vapor de água e porosidade aberta menos aceitáveis. No entanto, nenhuma argamassa estudada pelo autor conseguiu cumprir os requisitos para se considerar de isolamento térmico.

Verificar-se-á neste capítulo se as argamassas deste trabalho cumprem esses requisitos, averiguando também o efeito da adição do hidrófugo no comportamento das argamassas, pois esta é a principal diferença entre as argamassas de Martins, T. (2015) e as deste trabalho.

4.1 Análise granulométrica por peneiração

A areia de rio foi alvo de análise granulométrica por peneiração, donde resultou a curva granulométrica. Os resultados apresentados no Quadro 4.1 e na Figura 4.1 foram retirados do trabalho de Martins, T. (2015).

A massa total ensaiada foi de 213,52g e pode observar-se que a areia utilizada exhibe uma granulometria apropriada, apresentando partículas de várias dimensões, como é requerido em argamassas de revestimento.

Quadro 4.1 – Determinação da curva granulométrica da areia

Dimensão das aberturas do peneiro (mm)	Massa de material retido (kg)	Percentagem de material retido	Percentagem cumulativa de material passado
4	0,00149	0,70%	99,30%
2	0,02202	10,28%	89,02%
1	0,05748	26,84%	62,19%
0,5	0,08620	0,25%	21,94%
0,25	0,03898	18,20%	3,74%
0,125	0,00655	3,06%	0,68%
0,063	0,00071	0,33%	0,35%
P (<0,063)	0,00002	-	-

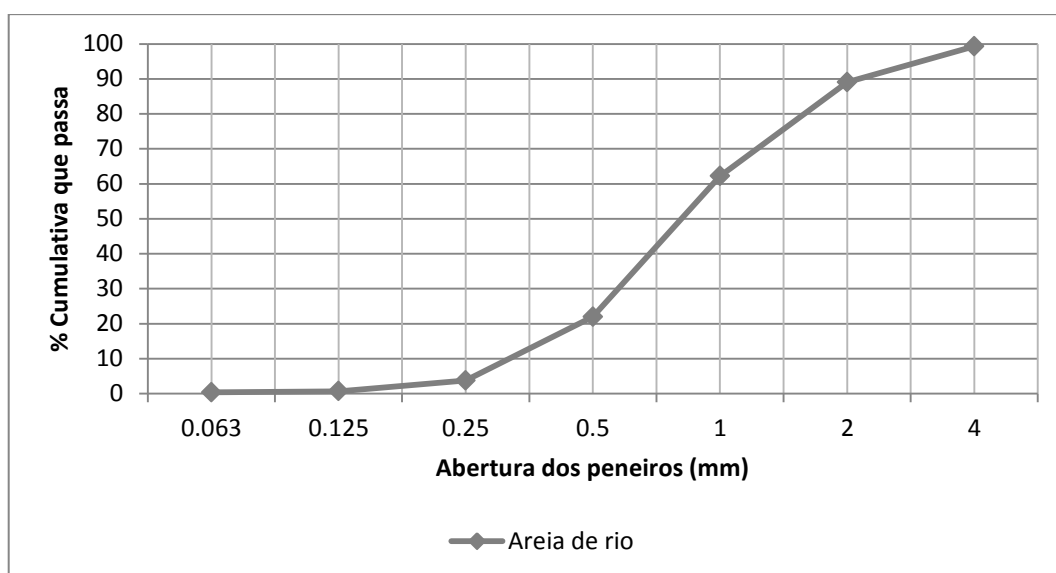


Figura 4.1 – Curva granulométrica da areia de rio

4.2 Baridade dos materiais

Os resultados deste ensaio resumem-se no Quadro 4.2, onde se observa que os materiais com maior e menor baridades são a areia de rio e a casca de arroz, respetivamente. Para um determinado volume, quanto menor for a baridade de um material, menor será a massa para preencher esse volume, então, o uso de resíduos em substituição de parte do agregado nas

argamassas, pode torná-las mais leves pois os seus valores de baridade são consideravelmente inferiores ao da areia.

Quadro 4.2 – Baridade das matérias-primas

Matéria-prima	Baridade (g/cm ³)
Cimento Portland	1,080
Areia de rio	1,425
Casca de arroz	0,112
Palha de arroz fina	0,196
Palha de arroz grossa	0,118

4.3 Consistência por espalhamento

Os valores obtidos para o ensaio de consistência de argamassas frescas por espalhamento são apresentados no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Consistência por espalhamento

Argamassa	Valores obtidos em duas direções perpendiculares (mm)	Consistência por espalhamento (mm)
AR	146,28	145,39
	144,50	
ACA	112,97	112,75
	112,53	
APAF	140,98	140,75
	140,52	
APAG	140,37	141,24
	142,10	

Note-se que todas as argamassas, à exceção de ACA, apresentam valores muito semelhantes de consistência por espalhamento. Esses valores encontram-se compreendidos entre 140 e 160 mm, intervalo que garante boa trabalhabilidade. ACA apresenta um valor inferior, no entanto, optou-se por não se alterar a quantidade de água até atingir a gama de valores definida pois a consistência e trabalhabilidade dessa argamassa revelaram-se adequados (Figura 4.2). A adição de mais água à mistura podia levar à ocorrência de segregação da argamassa, que é um efeito indesejável.



Figura 4.2 – Ensaio de consistência por espalhamento de ACA

4.4 Resistência à tração por flexão e à compressão

A resistência mecânica é uma das propriedades mais importantes para a caraterização de argamassas. Os resultados dos ensaios mecânicos podem observar-se no Quadro 4.4 e na Figura 4.3. Os valores da resistência à flexão e à compressão, R_f e R_c respetivamente, correspondem à média de três valores, uma vez que foram testados três provetes para cada tipo de argamassa.

Quadro 4.4 – Resistência à flexão e à compressão

Argamassa		R_f (Mpa)		R_c (Mpa)	
AR	AR1	4,751	4,702	22,125	22,005
	AR2	4,812		21,646	
	AR3	4,542		22,244	
ACA	ACA1	0,804	0,739	1,362	1,542
	ACA2	0,797		1,653	
	ACA3	0,616		1,610	
APAF	APAF1	0,019	0,041	0,065	0,068
	APAF2	0,075		0,102	
	APAF3	0,028		0,036	
APAG	APAG1	0,075	0,091	0,084	0,095
	APAG2	0,103		0,095	
	APAG3	0,094		0,105	

R_f – resistência à flexão; R_c – resistência à compressão.

Todas as argamassas, à exceção de AR, apresentam valores muito reduzidos de resistência à flexão e compressão, sendo APAF a que exhibe resultados mais desfavoráveis nos dois ensaios. ACA apresenta resultados superiores às argamassas de palha mas muito distantes dos valores obtidos para a AR.

No estudo levado a cabo por Martins, T. (2015) as argamassas de casca de arroz são também as que apresentam resultados de resistência à tração e à compressão mais elevados, obtendo o valor máximo para um traço 1:0,39:1,19 (cimento:areia:casca) e valores igualmente reduzidos em argamassas de palha grossa.

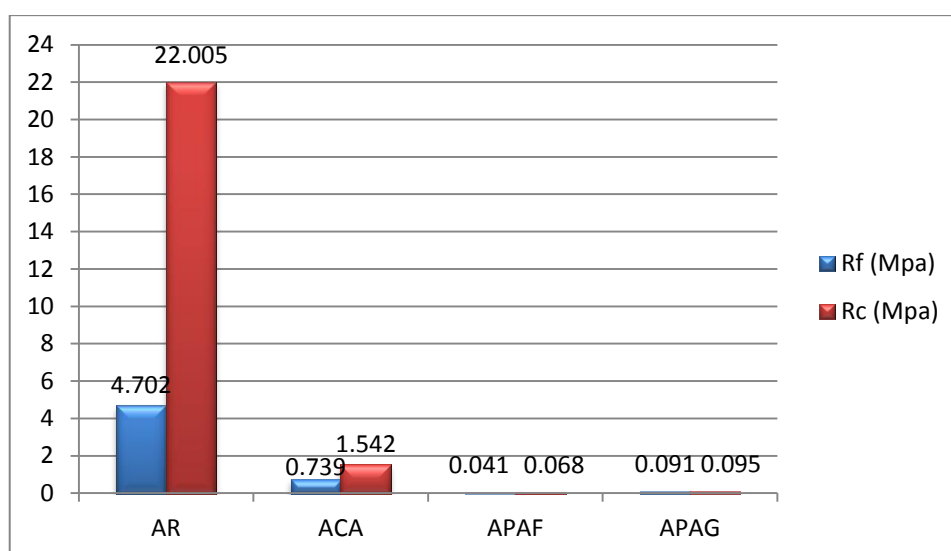


Figura 4.3 – Resumo dos resultados de resistência à flexão e à compressão

4.5 Porosidade aberta e massa volúmica aparente

No Quadro 4.5 e na Figura 4.4 podem ver-se os resultados obtidos para a porosidade aberta, ρ_0 e massa volúmica aparente, ρ_b . Mais uma vez, foram testados três provetes para cada tipo de argamassa e os valores finais correspondem à média dos três valores. APAF apresenta apenas um valor porque as amostras APAF1 e APAF3 se desfizeram durante o ensaio. Este facto deve-se à sua fraca resistência mecânica, como demonstrado no subcapítulo anterior.

Em relação à porosidade aberta, a argamassa mais porosa é a APAF, que apresenta o valor mais elevado. ACA e APAG também são mais porosas do que AR, que apresenta o menor valor. A massa volúmica varia inversamente à porosidade aberta, então, AR apresenta o maior valor de ρ_b . Desta forma, seria expectável que APAF apresentasse o menor valor deste

parâmetro mas verifica-se esse mínimo em ACA. Isso pode dever-se ao facto de a baridade da casca de arroz ser inferior à dos outros resíduos, o que pode ter uma influência direta nos resultados deste ensaio. Além disso, não foi possível obter os resultados para dois dos provetes de APAF, não sendo feita uma avaliação de resultados igual entre argamassas.

Quadro 4.5 – Porosidade aberta e massa volúmica aparente

Argamassa		ρ_b (kg/m ³)	ρ_0 (%)
AR	AR1	1893	17,80
	AR2	1882	17,87
	AR3	1889	17,91
		1888	17,86
ACA	ACA1	925	36,26
	ACA2	945	35,26
	ACA3	907	36,22
		925	35,94
APAF	APAF2	948	41,68
		948	41,68
APAG	APAG1	1131	27,74
	APAG2	1268	18,55
	APAG3	1114	28,49
		1171	24,93

ρ_b – massa volúmica aparente; ρ_0 – porosidade aberta.

Martins, T. (2015) obteve valores de porosidade aberta para ACA e APAG entre 40 e 50%, que são superiores aos resultados apresentados. Tal acontece, provavelmente, devido às diferenças nos traços das argamassas, que têm uma maior proporção de resíduo, quando comparadas com as deste estudo e ainda devido à presença do hidrófugo na mistura que obtura os capilares para impedir, parcialmente a circulação de água.

Com esta análise de resultados, pode afirmar-se que a introdução de resíduos de casca e palha de arroz nas misturas faz aumentar o valor de porosidade aberta. Este facto não é positivo porque um valor elevado de ρ_0 acarreta desvantagens pois a água é mais livre de circular no interior dos poros abertos da argamassa, mas a introdução do hidrófugo vem atenuar essa desvantagem.

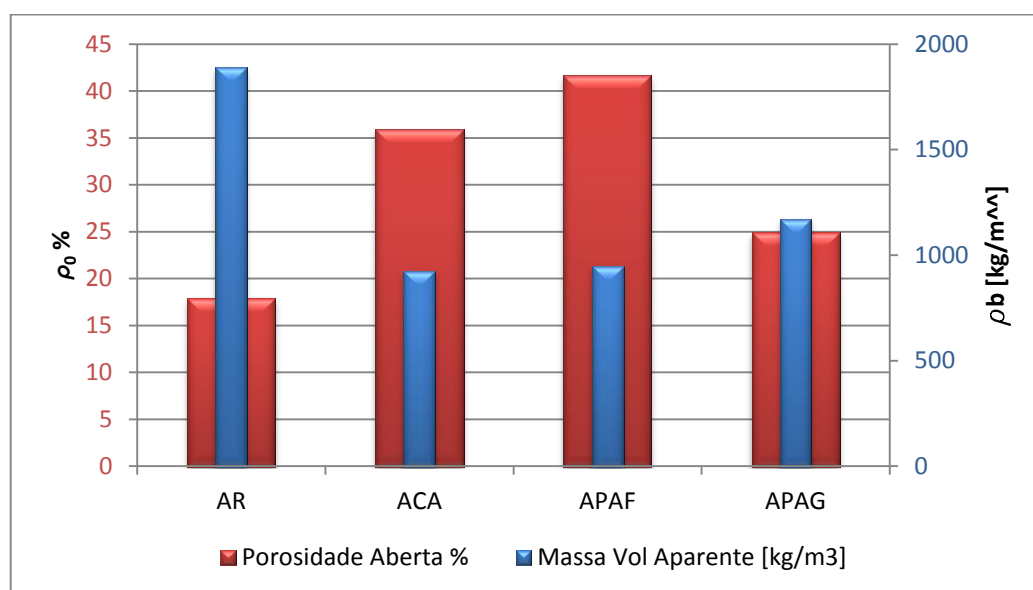


Figura 4.4 – Resumo dos resultados de porosidade aberta e massa volúmica aparente

4.6 Absorção de água por capilaridade

Também neste ensaio foram ensaiados três provetes para cada tipo de argamassa e considerou-se a massa de água absorvida por unidade de superfície, M_i , a média dos M_i dos três provetes correspondentes. Traçou-se a curva de absorção capilar para cada tipo de argamassa que exprime a quantidade de água absorvida por m^2 , em relação à raiz quadrada do tempo i , em minutos (Figura 4.5). Esta é a representação de resultados segundo a já referida norma EN 15801:2009 (BSI, 2009).

Além da representação gráfica, apresenta-se no Quadro 4.6 o coeficiente de absorção de água por capilaridade, C , para cada tipo de argamassa, que é tanto maior quanto mais rápida for a absorção de água na argamassa, e o valor assintótico.

Quadro 4.6 – Coeficiente de absorção de água por capilaridade

Argamassa	C ($kg/m^2 \cdot min^{0,5}$)	V. Ass. (kg/m^2)
AR	0,581	15,00
ACA	0,345	21,08
APAF	0,072	27,07
APAG	0,051	18,97

C – coeficiente de capilaridade; V. Ass. – valor assintótico.

Conclui-se que AR é a que absorve água mais rapidamente seguida de ACA. APAF e APAG exibem valores de C muito inferiores. Tal facto é devido à presença do hidrófugo que tem uma influência direta neste ensaio, pois o seu efeito consiste na obturação dos capilares, evitando a penetração de água por capilaridade. A todas as argamassas com incorporação de resíduos foi adicionada a mesma quantidade de hidrófugo (em %), pelo que a discrepância acentuada de valores entre ACA e as argamassas de palha será consequência das características do resíduo. Através da comparação com os resultados obtidos por Martins, T. (2015), onde se observam valores muito superiores de C para argamassas de palha grossa, na ordem de $1,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$ e de $0,60 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$ para as de casca, pode confirmar-se que um dos objetivos pretendidos, que era a diminuição do coeficiente de absorção, foi atingido.

O valor assintótico corresponde ao valor da variação de massa relativamente à massa inicial, depois de atingir massa constante. Este parâmetro representa a quantidade total de água absorvida em relação à área de contacto com a água, apresentando o seu máximo em APAF, de onde se conclui que a palha fina absorve mais água, quando comparada à palha grossa e à casca. Martins, T. (2015) obteve valores assintóticos superiores, na ordem dos 34 e 25 kg/m^2 , para as argamassas de palha grossa e de casca, respetivamente. Mais uma vez, o hidrófugo será o principal responsável por estas diferenças.

Note-se ainda que neste estudo ACA absorveu maior quantidade de água e mais rapidamente que APAG, ao contrário do que obteve Martins, T. (2015) para as argamassas semelhantes com as quais se comparam os resultados. O confronto de resultados deste ensaio não permite retirar conclusões diretas, uma vez que se obtiveram resultados inversos e em condições desiguais devido ao hidrófugo.

Analisando a Figura 4.5, note-se que AR foi a primeira argamassa a estabilizar, no decorrer de 48 horas, enquanto nas restantes, a estabilização aconteceu ao fim de 144 horas, ou seja, seis dias. Veja-se que as argamassas com incorporação de resíduos se comportaram de forma muito semelhante, estabilizando no mesmo instante. Na mesma figura, nota-se uma diminuição na curva correspondente a APAF devido a estes provetes se terem desintegrado e perdido massa, quando em contacto com a água.

A Figura 4.6 mostra a evolução de absorção por capilaridade das argamassas nas primeiras três horas de ensaio, onde se confirma que AR é a mais rápida nesse processo, como se tinha concluído com a análise do Quadro 4.6.

Os provetes foram mantidos dentro da tina com água durante mais tempo do que o necessário pois o ensaio de secagem estava dependente do ensaio de absorção por capilaridade e o

primeiro só iniciou mais tarde, carecendo dos provetes completamente saturados. Assim, utilizaram-se os dados dos treze dias decorridos, pois foram feitas pesagens no 13º dia antes do início do ensaio de secagem.

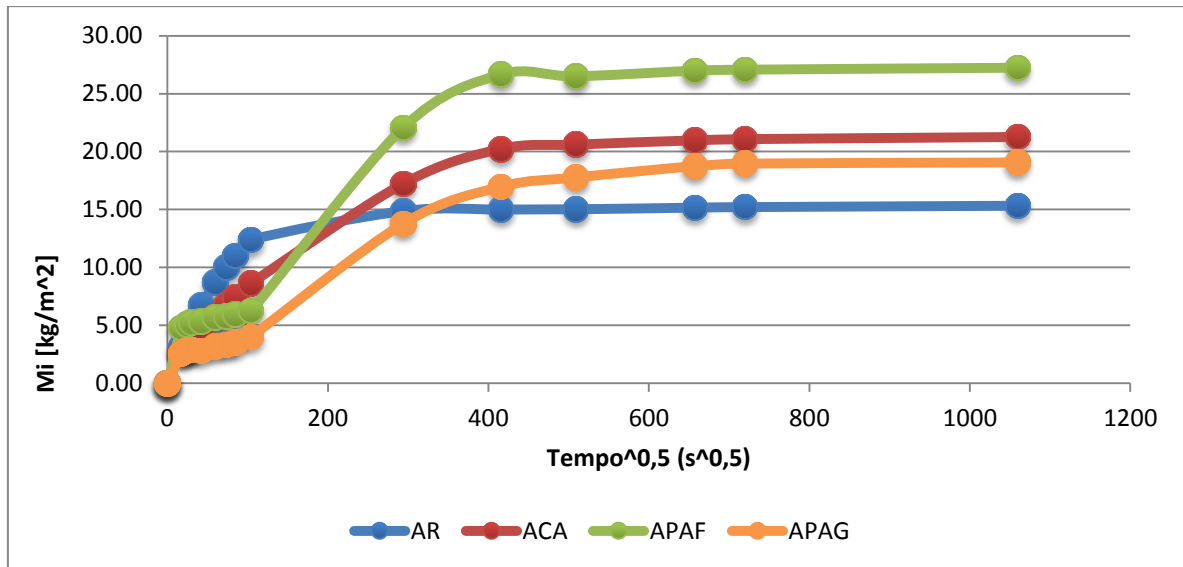


Figura 4.5 – Absorção de água por capilaridade no tempo total de ensaio

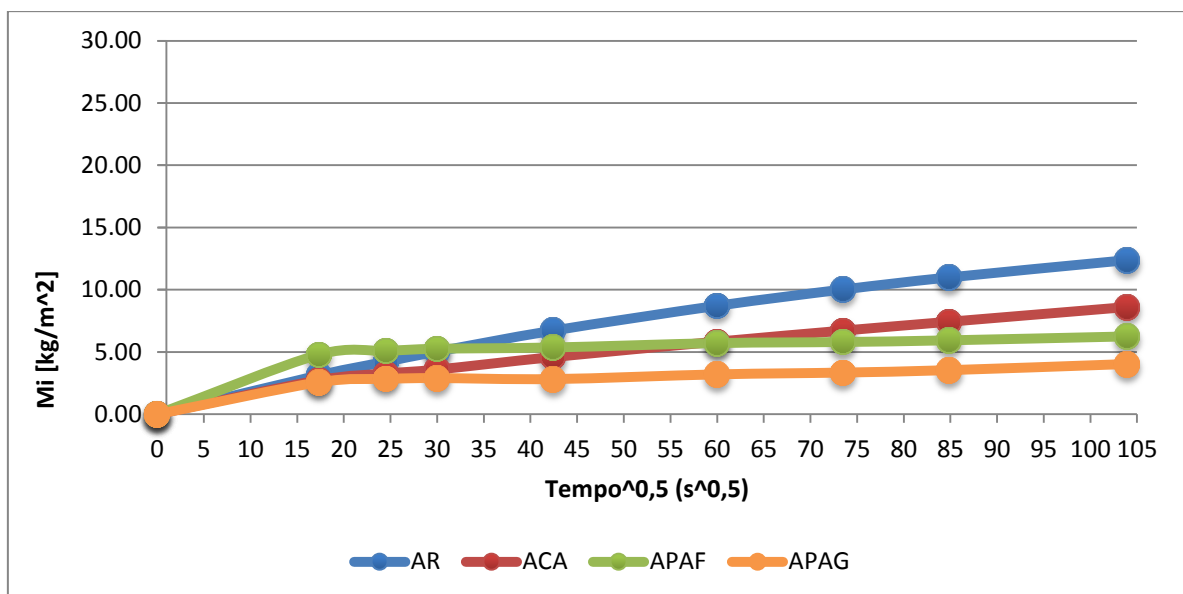


Figura 4.6 – Absorção de água por capilaridade nas primeiras três horas de ensaio

4.7 Secagem

No Quadro 4.7 estão registados os valores do índice de secagem para as diferentes argamassas onde se nota que a argamassa de referência é a que seca de forma mais rápida e fácil, pois apresenta o menor valor de IS. Nas argamassas com resíduos, APAG apresenta o melhor comportamento de secagem e APAF o pior e ACA com um valor próximo da segunda.

Quadro 4.7 – Índice de secagem

Argamassa	IS
AR	0,330
ACA	0,569
APAF	0,590
APAG	0,406

A curva de secagem ilustra-se na Figura 4.7. O período total de secagem corresponde a 336 horas, ou seja, catorze dias até se atingir a estabilização de todos os provetes. A primeira argamassa a estabilizar foi AR, necessitando de 48 horas e a última foi APAF pois absorveu mais água e leva mais tempo a eliminá-la. O comportamento das argamassas com incorporação de resíduos afasta-se do comportamento de AR, pois além de absorverem mais água são mais lentas a eliminá-la, o que não é um fator satisfatório.

Para melhor ilustrar o que foi descrito nos parágrafos anteriores, construiu-se a curva de secagem para os primeiros oito dias de ensaio (192 horas) (Figura 4.8) onde é perceptível que APAF é a argamassa com secagem mais lenta, apresentando uma maior inclinação da curva, ao contrário de AR que é a mais rápida. Globalmente pode afirmar-se que a introdução de resíduos é francamente desfavorável para a secagem das argamassas, pois quanto mais rápida a secagem maior a sua durabilidade e todas as argamassas com resíduos revelaram um pior comportamento face à argamassa de referência.

As argamassas com palha grossa no trabalho de Martins, T. (2015) também apresentaram uma secagem mais rápida que as de casca, o que se verifica também nas argamassas em estudo. Assim pode-se concluir que a palha grossa permite melhor secagem que a casca, o que não se verificou com a palha fina.

Relembre-se que este ensaio foi feito com os provetes do ensaio anterior, após estarem completamente saturados, ou seja, mais uma vez, os resultados apresentados resultam da média de três amostras para cada tipo de argamassa.

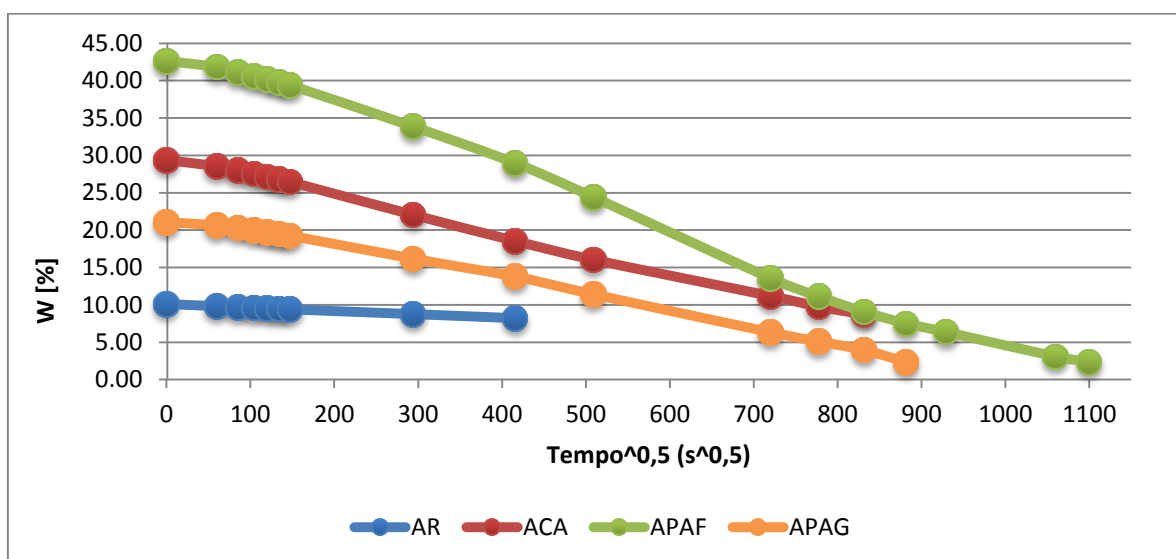


Figura 4.7 – Curva de secagem no tempo total de ensaio

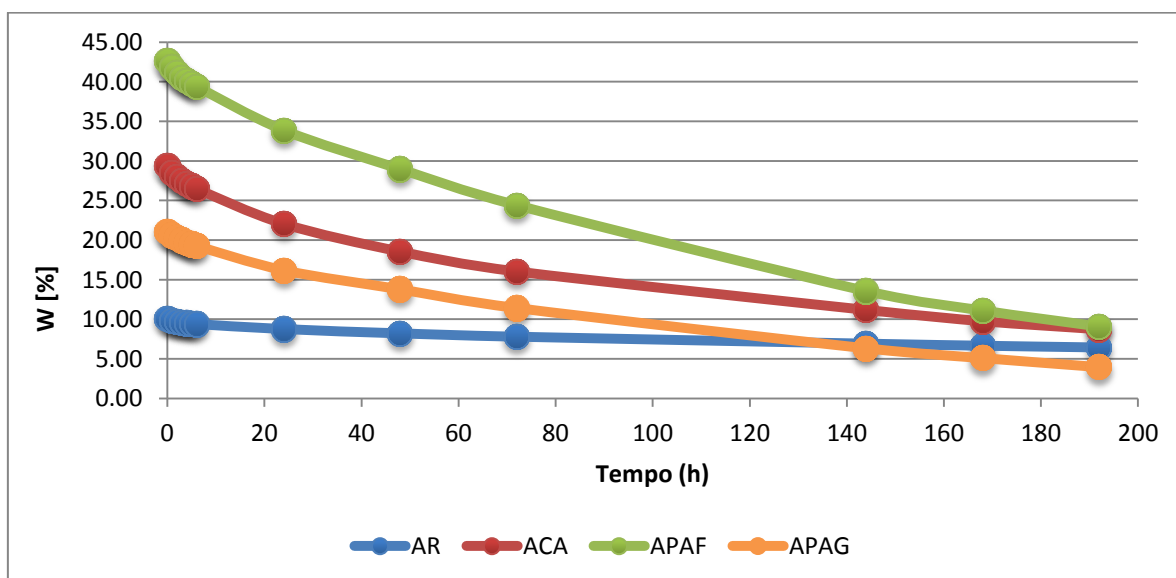


Figura 4.8 – Curva de secagem nos primeiros 8 dias

4.8 Permeabilidade ao vapor de água

Neste ensaio, de acordo com a norma ISO 12572:2001 (ISO, 2001), foram ensaiados cinco provetes para cada tipo de argamassa e os resultados obtêm-se a partir média dos valores das cinco amostras (Quadro 4.8).

Como se pode confirmar com a análise da Figura 4.9, a permeabilidade ao vapor de água é inversamente proporcional à espessura da camada de ar equivalente. A argamassa que apresenta pior comportamento à permeabilidade ao vapor de água, com menor valor de δ e maior valor de μ , é AR e ambas as argamassas de palha são as que têm melhor desempenho neste ensaio, seguindo-se ACA. É possível comprovar que os resíduos de casca e palha melhoram o comportamento das argamassas neste ensaio.

Martins, T. (2015) retirou conclusões semelhantes em relação às argamassas de palha e casca de arroz, ou seja, este autor obteve valores bastante satisfatórios de δ , na ordem dos $4,50 \times 10^{-11}$ e $1,60 \times 10^{-11}$, para argamassas de palha grossa e de casca, respetivamente.

Quadro 4.8 – Resultados do ensaio de permeabilidade ao vapor de água

Argamassa		δ (kg/(m.s.Pa))		μ		S_d (m)	
AR	AR1	$6,54 \times 10^{-12}$	$6,43 \times 10^{-12}$	29,83	30,49	0,48	0,49
	AR2	$7,16 \times 10^{-12}$		27,25		0,44	
	AR3	$6,09 \times 10^{-12}$		32,02		0,51	
	AR4	$5,85 \times 10^{-12}$		33,31		0,53	
	AR5	$6,49 \times 10^{-12}$		30,05		0,48	
ACA	ACA1	$1,81 \times 10^{-11}$	$1,66 \times 10^{-11}$	10,79	11,76	0,17	0,19
	ACA2	$1,64 \times 10^{-11}$		11,91		0,19	
	ACA3	$1,58 \times 10^{-11}$		12,32		0,20	
	ACA4	$1,54 \times 10^{-11}$		12,63		0,20	
	ACA5	$1,75 \times 10^{-11}$		11,15		0,18	
APAF	APAF1	$3,16 \times 10^{-11}$	$2,99 \times 10^{-11}$	6,16	6,52	0,10	0,10
	APAF2	$3,02 \times 10^{-11}$		6,45		0,10	
	APAF3	$2,91 \times 10^{-11}$		6,71		0,11	
	APAF4	$2,95 \times 10^{-11}$		6,61		0,11	
	APAF5	$2,93 \times 10^{-11}$		6,66		0,11	
APAG	APAG1	$2,57 \times 10^{-11}$	$2,57 \times 10^{-11}$	7,59	7,13	0,12	0,11
	APAG2	$2,83 \times 10^{-11}$		6,89		0,11	
	APAG3	$3,10 \times 10^{-11}$		6,29		0,10	
	APAG4	$2,54 \times 10^{-11}$		7,66		0,12	
	APAG5	$2,70 \times 10^{-11}$		7,23		0,12	

δ – permeabilidade ao vapor de água; μ – fator de resistência ao vapor de água; S_d – espessura da camada de ar equivalente.

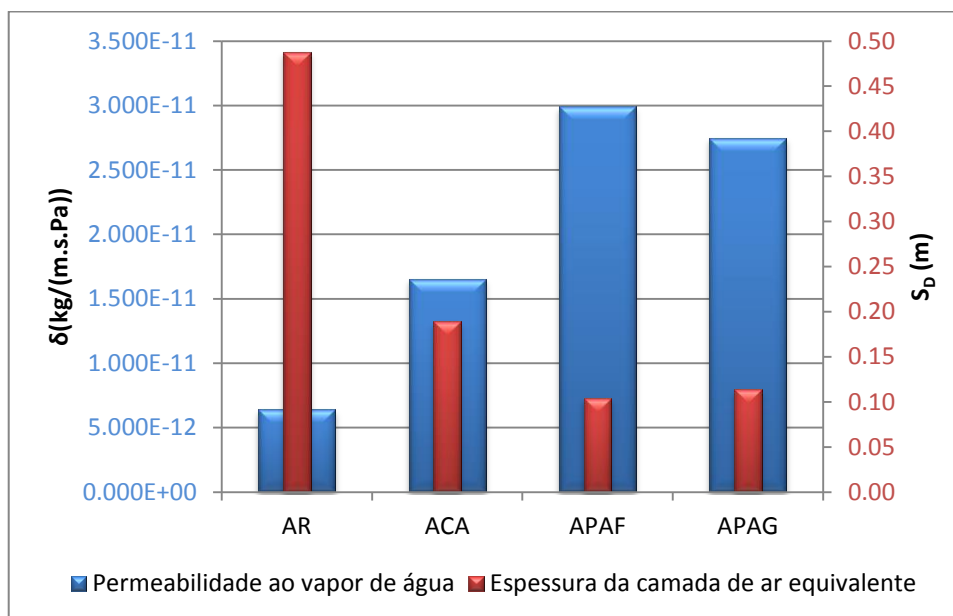


Figura 4.9 – Permeabilidade ao vapor de água e espessura da camada de ar equivalente

4.9 Condutibilidade Térmica

O ensaio de condutibilidade térmica foi executado em três provetes para cada tipo de argamassa calculando-se a média dos valores de λ e R_T para apresentação de resultados (Quadro 4.9).

As argamassas de referência, AR, são as que apresentam menor resistência térmica e portanto maior coeficiente de condutibilidade térmica, uma vez que estes parâmetros são inversamente proporcionais (Figura 4.10). APAG apresenta valores de λ mais favoráveis, seguindo-se APAF e por fim ACA, onde λ é sempre inferior a 0,2.

Martins, T. (2015) obteve valores de λ superiores para as argamassas de palha e casca que testou, mas ainda assim melhores que os de AR, onde evidenciou de igual modo que a palha de arroz grossa é também mais favorável que a casca. Torna-se evidente que a adição destes resíduos às argamassas é francamente vantajosa do ponto de vista do desempenho térmico.

Quadro 4.9 – Condutibilidade térmica e resistência térmica

Argamassa		λ (W/m.°C)		R_T (m ² .°C/W)
AR	AR1	0,343	0,341	0,117
	AR2	0,370		
	AR3	0,311		
ACA	ACA1	0,148	0,155	0,258
	ACA2	0,150		
	ACA3	0,168		
APAF	APAF1	0,129	0,127	0,315
	APAF2	0,128		
	APAF3	0,123		
APAG	APAG1	0,106	0,108	0,372
	APAG2	0,108		
	APAG3	0,109		

λ – coeficiente de condutibilidade térmica; R_T – resistência térmica.

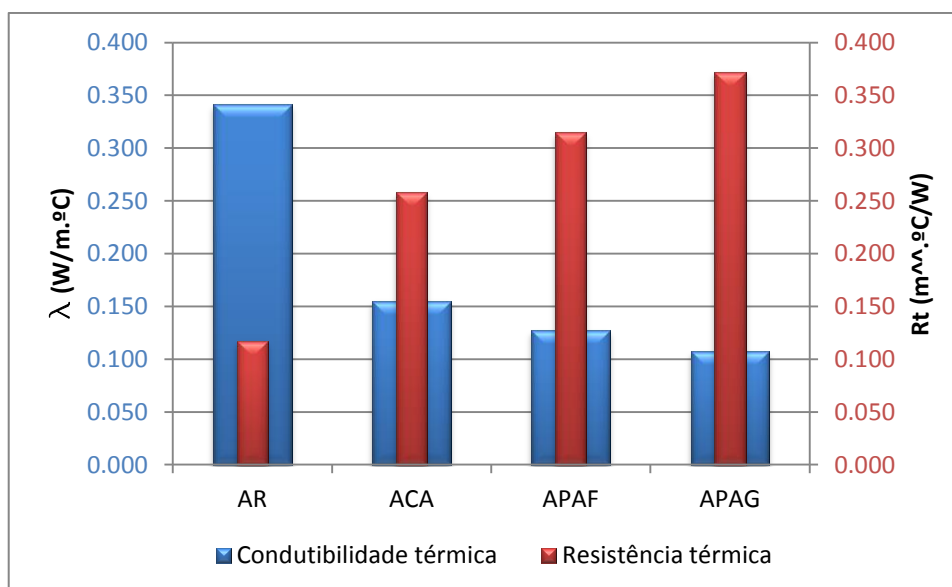


Figura 4.10 – Resumo dos resultados do ensaio para determinação da condutibilidade térmica

4.10 Discussão de resultados

Neste subcapítulo pretende-se fazer uma breve reflexão e análise global dos resultados obtidos, fazendo o paralelismo entre alguns desses resultados, procurando tirar conclusões relevantes.

No que diz respeito à resistência mecânica das argamassas, pode-se assumir que a introdução de resíduos de casca e palha de arroz faz com que apresentem valores muito baixos de resistência à flexão e à compressão, principalmente a introdução de palha, não existindo uma diferença notável quer a palha seja grossa ou fina. Note-se que o traço volumétrico adotado é de 1:2,5 (cimento:agregado) para todas as argamassas em que, nas argamassas com incorporação de resíduos, parte da areia é substituída por palha ou casca de arroz. No Quadro 3.1 já se mostraram os traços das argamassas, de onde se constata que a casca de arroz confere características mecânicas muito melhores que a palha de arroz fina ou grossa, pois ACA contém uma menor quantidade de areia e mais de resíduo que APAF ou APAG e ainda assim apresenta melhores valores de R_f e R_c .

Veja-se agora a Figura 4.11, onde se relaciona a porosidade aberta e a permeabilidade ao vapor de água das argamassas. Estes parâmetros estão diretamente relacionados e é desejável que a permeabilidade ao vapor de água seja elevada e pode ver-se que esse valor tende a aumentar com o aumento de ρ_0 .

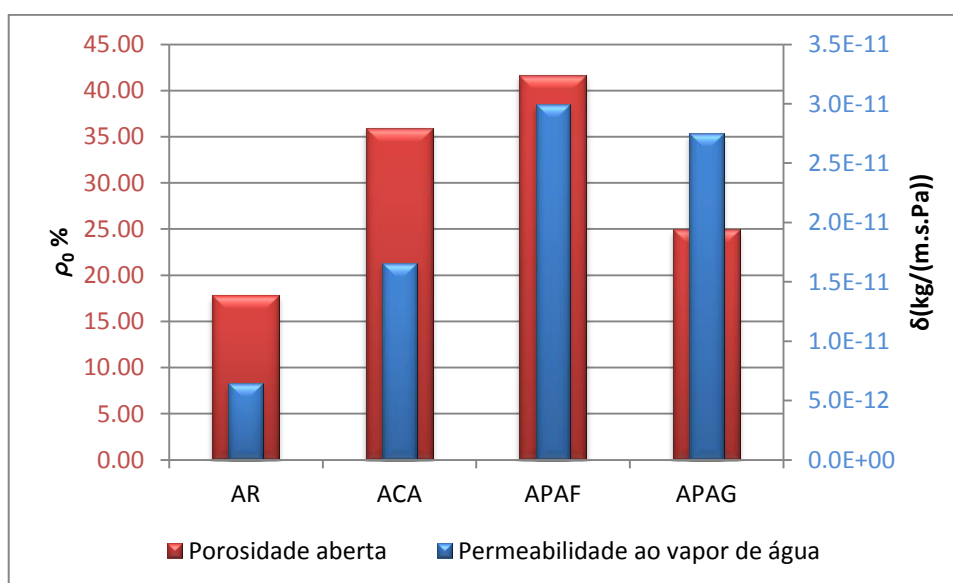


Figura 4.11 – Porosidade aberta e permeabilidade ao vapor de água

À semelhança da conclusão retirada anteriormente, na Figura 4.12 verifica-se uma relação evidente entre a porosidade aberta e o índice de secagem. Interessa obter baixos índices de secagem, que traduzem rapidez no processo de secagem. Globalmente, AR apresenta melhor comportamento, seguindo-se APAG com valores não muito discrepantes.

Fazendo um paralelismo entre o coeficiente de absorção por capilaridade, C , e a porosidade aberta, é expectável uma relação diretamente proporcional entre esses parâmetros. No entanto, observam-se valores baixos de C nas argamassas com resíduos e porosidade aberta elevada. Encontra-se assim uma relação direta entre a adição do hidrófugo à mistura e a absorção capilar, diminuindo este parâmetro e portanto, a absorção de água processa-se de forma mais lenta (Figura 4.13). No entanto, como já se referiu no subcapítulo 4.6, AR absorveu menor quantidade de água, apesar de o fazer de forma mais rápida.

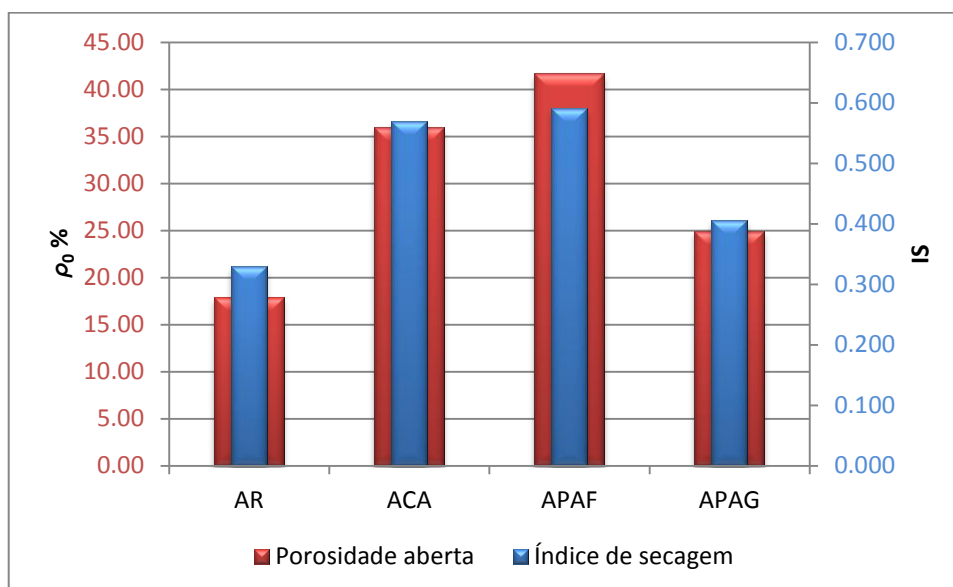


Figura 4.12 – Porosidade aberta e índice de secagem

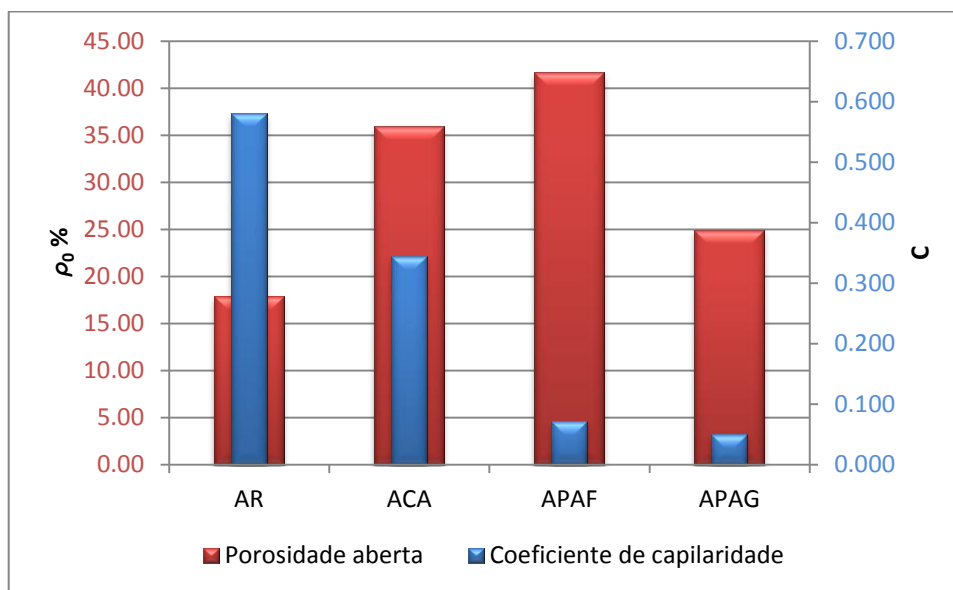


Figura 4.13 – Porosidade aberta e coeficiente de capilaridade

Finalmente veja-se a Figura 4.14 onde se compara o índice de secagem e o coeficiente de capilaridade. Procura-se que estes valores sejam ambos baixos e desta forma não é possível encontrar a argamassa ideal com esta análise.

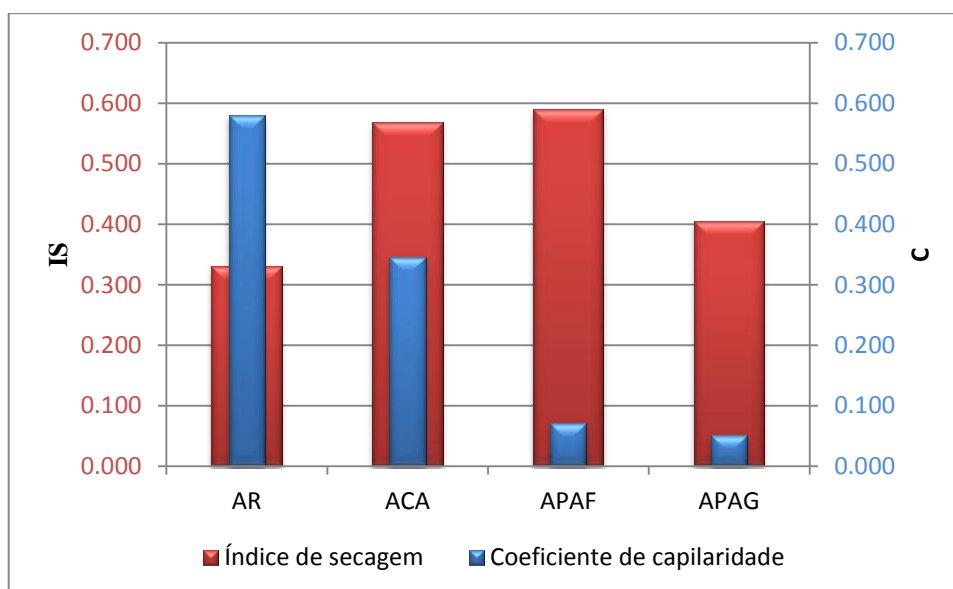


Figura 4.14 – Índice de secagem e coeficiente de capilaridade

Em relação às propriedades térmicas, já se mencionou no subcapítulo 4.9 que os resíduos de casca e palha de arroz conferem melhores características às argamassas, superando AR.

No Quadro 4.10 apresenta-se uma síntese dos resultados obtidos para as quatro argamassas estudadas e no Quadro 4.11 os requisitos que uma argamassas deve cumprir para ser considerada uma argamassa de isolamento térmico, segundo a norma NP EN 998-1:2013 (IPQ, 2013) e se as argamassas com incorporação de resíduos, ACA, APAF e APAG cumprem ou não esses requisitos.

Da análise dos referidos quadros, conclui-se que ACA cumpre os requisitos essenciais para ser considerada uma argamassa de isolamento térmico, enquanto APAF e APAG não possuem a resistência à compressão dentro do intervalo requerido.

Quadro 4.10 – Síntese dos resultados

Argamassa	Argamassas frescas	Argamassas endurecidas								
	Consistência por esp. (mm)	R _f (MPa)	R _c (MPa)	ρ _b (kg/m ³)	ρ ₀ (%)	C (kg/m ² .min ^{0,5})	IS	δ (kg/(m.s.Pa))	μ	λ (W/m.°C)
AR	145,39	4,702	22,005	1888	17,86	0,581	0,330	6,425x10 ⁻¹²	30,49	0,341
ACA	112,75	0,739	1,542	925	35,94	0,345	0,569	1,653x10 ⁻¹¹	11,84	0,155
APAF	140,75	0,041	0,068	948	41,68	0,072	0,590	2,995x10 ⁻¹¹	6,52	0,127
APAG	141,24	0,091	0,095	1171	24,93	0,051	0,406	2,748x10 ⁻¹¹	7,13	0,108

Quadro 4.11 – Verificação dos requisitos para se obter uma argamassa de isolamento térmico

Argamassa		ρ _b (kg/m ³)	R _c (MPa)	C (kg/m ² .min ^{0,5})	μ	λ (W/m.°C)
		Gama declarada de valores	Categoria CS I (0,4 a 2,5) a CS II (1,5 a 5,0)	Categoria W1 (≤0,40)	≤15	T1 (≤0,1) ou T2 (≤0,2)
ACA	Cumpre os requisitos?	-	Sim	Sim	Sim	Sim
APAF		-	Não	Sim	Sim	Sim
APAG		-	Não	Sim	Sim	Sim

5. CONCLUSÕES

Pretendia-se caraterizar a nível mecânico e higrotérmico argamassas de cimento com incorporação de resíduos de casca e palha de arroz, obtendo uma argamassa com requisitos de isolamento térmico, segundo a norma NP EN 998-1:2013 (IPQ, 2013). Para tal, foram executados provetes de três argamassas diferentes, incluindo esses resíduos na sua composição, duas com palha, APAG e APAF e outra com casca de arroz, ACA. Dando continuidade ao trabalho de Martins, T. (2015), realizaram-se diversos ensaios experimentais sobre as amostras produzidas, como este autor já tinha feito, e retiraram-se algumas conclusões.

Conclui-se que os objetivos desta dissertação foram atingidos com êxito, pois foi possível caraterizar as argamassas com incorporação de resíduos de casca e palha de arroz, tendo-se realizado os ensaios inicialmente previstos e cumprindo os limites de tempo impostos. Assim contribui-se para o melhor conhecimento sobre a incorporação desses resíduos em argamassas.

Os ensaios basearam-se nas normas referidas e apresentadas na bibliografia de uma forma o mais rigorosa possível e as ligeiras alterações feitas aos mesmos foram devidamente justificadas ao longo do texto, para que os dados aqui obtidos possam ser usados de forma fiável para consulta futura e o estudo continuado.

Todas as misturas foram ensaiadas aos 28 dias e ficou por analisar o comportamento das argamassas face ao ensaio de envelhecimento acelerado, o que seria importante pois dá uma perceção sobre a durabilidade das argamassas.

Analisando resumidamente os resultados obtidos, ACA destacou-se das argamassas de palha pois foi a única que conseguiu cumprir os requisitos essenciais para ser considerada uma argamassa térmica, segundo a norma NP EN 998-1:2013 (IPQ, 2013). Saliente-se o fraco comportamento de APAF e APAG face aos ensaios mecânicos e os resultados vantajosos a nível de desempenho térmico de todas as misturas. A permeabilidade ao vapor de água apresenta melhores resultados nas argamassas com resíduos do que em AR, mas o coeficiente de capilaridade, índice de secagem e porosidade aberta são mais favoráveis em AR do que nas argamassas com incorporação de resíduos. A influência do hidrófugo foi também comprovada no ensaio de absorção por capilaridade.

Pode-se afirmar que a incorporação de resíduos de casca e palha de arroz em argamassas contribui para a melhoria do comportamento térmico das mesmas. Confirmaram-se alguns resultados testados pela primeira vez por Martins, T. (2015), encontrando alguma viabilidade no uso dos referidos resíduos em argamassas de reboco com características de isolamento térmico. Esta confirmação poderá trazer vantagens a nível ambiental, mas também a nível económico.

No entanto, uma boa argamassa de revestimento depende de outras características, para além das que foram estudadas neste trabalho. A aderência ao suporte, a reação ao fogo, o cálculo do módulo de elasticidade, entre outros, permitem determinar se uma argamassa é adequada para revestimento de paramentos.

Para um estudo mais completo deste tipo de argamassas, poder-se-ão realizar futuramente ensaios adicionais, tais como ensaios de aderência ao suporte ou de resistência ao fogo, bem como repetir os ensaios desta dissertação, mas com outros traços volumétricos. Além disso, pode ser interessante averiguar o comportamento de argamassas com incorporação de resíduos do cultivo de arroz, mas utilizando outro ligante, tal como a cal hidráulica.

A eliminação ou reutilização de resíduos provenientes de qualquer atividade revela-se urgente pelo que se considera que qualquer investigação neste âmbito será vantajosa a nível económico e ambiental.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agostinho, C. (2008). "Estudo da evolução do desempenho no tempo de argamassas de cal aérea". Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- BSI. (2009). *BS EN 15801:2009 - Conservation of cultural property. Determination of water absorption by capillarity*. London, UK: British Standard.
- Cavaco, L. (2005). "Técnicas de aplicação de argamassas de revestimento em edifícios antigos. Influência no desempenho". Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- CEN. (1999). *EN 1015-11:1999 - Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. Brussels, Belgium: CEN.
- CEN. (1999). *EN 1015-3:1999 - Methods of teste for mortar for masonry. Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*. Brussels, Belgium: CEN.
- CEN. (2001). *EN 12664:2001 - Thermal performance of building materials and products - Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate ant heat flow meter methods - Dry and moist products of medium and low thermal resistance*. Brussels, Belgium: CEN.
- CEN. (2002). *EN 1015-18:2002 - Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absortion coefficient due to capillary action of hardened mortar*. Brussels, Belgium: CEN.
- CGIAR. (2015). <http://www.ricepdia.org>, The online authority of rice.
- Coutinho, J. (1999). "Agregados para Argamassas e Betões", Materiais de Construção I, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Ferreira, M. (2012). "Análise das características mecânicas de amostras de argamassas pré-doseadas". Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Ferreira, T. (2011). "Análise do comportamento higrotérmico de argamassas de cal aérea com resíduos cerâmicos". Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.
- Freitas, V., Torres, I., & Guimarães, A. (2008). "Humidade Ascensional". FEUP Edições. 1ª Edição. Porto.
- Fruitoso, A. (2013). "Influência de agregados provenientes de RCD e cinzas volantes não conformes em argamassas de cal aérea". Tese de Mestrado, FCT - Universidade Nova de Lisboa.

- IPQ. (2002). *NP EN 1097-3:2002 - Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios*. Caparica, Portugal: IPQ.
- IPQ. (2008). *NP EN 1015-19:2008 - Métodos de ensaio de argamassas para alvenaria. Parte 19: Determinação da permeabilidade ao vapor de água de argamassas de reboco endurecidas*. Caparica, Portugal: IPQ.
- IPQ. (2008). *NP EN 1936:2008 - Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta*. Caparica, Portugal: IPQ.
- IPQ. (2013). *NP EN 998-1:2013 - Especificação de argamassas para alvenarias. Parte 1: Argamassas para rebocos interiores e exteriores*. Caparica, Portugal: IPQ.
- ISO. (2001). *ISO 12572:2001 - Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties*. Geneva, Switzerland: ISO.
- Leal, M. (2012). "Desenvolvimento de argamassas de revestimento com comportamento térmico melhorado". Tese de Mestrado em Construção Civil, Instituto Politécnico de Setúbal.
- Martins, A. (2008). "Estudo da influência da dosagem de cimento no desempenho de argamassas de reboco". Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Martins, T. (2015). "Estudo do comportamento de argamassas com incorporação de casca/palha de arroz". Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.
- Matias, G. (2008). "A influência de resíduos de tijolo no comportamento de argamassas de cal". Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.
- Matias, G. (2014). "Argamassas de reabilitação com resíduos de cerâmica". Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.
- Mendonça, B. (2007). "Estudo do Desempenho das Argamassas Hidráulicas". Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Miranda, L. (2009). "Estudo comparativo entre argamassas de revestimento à base de cimento com adição de cal hidráulica e de cal hidratada". Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real.
- Murakami, K., Sato, M., Kato, T., & Sugawara, K. (2012). "Influence of difference in chemical compositions of rice straw on hydrogen formation in nickel-catalyzed steam gasification". *Fuel Processing Technology*, Vol. 95, pp. 78-83.
-

- Parlamento e Conselho Europeu. (2011). Regulamento (UE) N.º 305/2011, de 9 de Março de 2011. *Jornal Oficial da União Europeia*.
- Paulo, R. (2006). "Caracterização de Argamassas Industriais". Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro.
- Penas, F. (2008). "Argamassas de Cal Hidráulica para Revestimentos de Paredes". Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Raimundo, A. (2013). "Argamassas de cal hidráulica natural com incorporação de resíduos de mosaico de barro vermelho". Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.
- Rama, J. (2014). "Eco-painéis construídos a partir de madeira e resíduos de palha/casca de arroz". Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.
- Ribeiro, J., & Chorincas, J. (2011). *Carta Regional de Competitividade do Baixo Mondego*.
- Rodrigues, P. (2004). "Argamassas de revestimento para alvenarias antigas". Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa.
- Silva, H. (2012). "Análise do comportamento de argamassas de cal aérea com resíduo de cerâmica em granulometria fina". Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.
- Tomás, A. (2012). "Análise do comportamento de argamassas de cal aérea com resíduos cerâmicos em substituição de parte do agregado". Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.
- Torres, I. (2004). "Humidade ascensional em paredes de construções históricas". Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra.
- Veiga, M. (1998). "Comportamento de argamassas de revestimento de paredes". Tese de Doutoramento em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Velosa, A. (2006). "Argamassas de cal com pozolanas para revestimentos de paredes antigas". Tese de Doutoramento na especialidade de Reabilitação do Património Edificado. Secção autónoma de Engenharia Civil – Universidade Aveiro.